THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Primo CORTINI

1ere THÈSE. — Étude expérimentale de joints horizontaux entre panneaux préfabriqués pour murs de bâtiment.

2e THÈSE. — Propositions de la Faculté :
Réacteurs homogènes et hétérogènes appliqués aux moteurs à combustion interne.

Soutenues le 24 Mars 1972 devant la Commission d'examen.

MM. les Prs SIESTRUNCK *Président.*

VICHNIEVSKY
ROBINSON *Examinateurs.*
FAUCHART

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Primo CORTINI

1ere THÈSE. — Étude expérimentale de joints horizontaux entre panneaux préfabriqués pour murs de bâtiment.

2e THÈSE. — Propositions de la Faculté :
Réacteurs homogènes et hétérogènes appliqués aux moteurs à combustion interne.

Soutenues le 24 Mars 1972 devant la Commission d'examen.

MM. les Prs SIESTRUNCK *Président.*

VICHNIEVSKY
ROBINSON *Examinateurs.*
FAUCHART

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

0 - RESUME

La présente recherche expérimentale a trait aux joints horizontaux entre grands panneaux préfabriqués de bâtiment et qui sont donc sollicités par un effort oblique, de composantes : normale N et tangente T.

15 joints ont été essayés au Centre d'Essais des Structures de Saint-Rémy-lès-Chevreuse. Ils appartiennent aux 4 types suivants : lisses ou crantés d'une part, armés ou non, d'autre part. Ils ont été fissurés suivant les surfaces de reprise préalablement à l'essai.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- La rupture n'est jamais fragile : elle ne se produit qu'après de grandes déformations.

- La rupture des joints lisses se produit par glissement de part et d'autre des plans de reprise, avec mise en oeuvre d'un coefficient de frottement voisin de 0,7 seulement pour les surfaces lisses essayées.

- La rupture des joints crantés se produit par cisaillement-compression des crans ; les armatures de couture des reprises de bétonnage, d'aire unitaire A, atteignent leur limite élastique σ_e. L'effort normal de compression N joue, à rupture, le même rôle que le produit A σ_e, auquel on peut l'ajouter. Les résultats expérimentaux sont confrontés à différentes méthodes de calcul. On propose, avec prudence, une formule purement empirique.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543514_0010

1 - INTRODUCTION.

1,1 - Généralités.

De nombreux bâtiments sont actuellement construits à partir de grands panneaux porteurs verticaux préfabriqués, de hauteur égale à celle de l'étage, et assemblés par des joints verticaux, d'une part, et horizontaux d'autre part.

Sous l'action des charges extérieures horizontales dues à l'effet du vent et d'éventuelles secousses sismiques, le bâtiment fléchit. Les diverses consoles verticales constituées par des panneaux superposés tendent donc à fléchir indépendamment, et à glisser les unes sur les autres.

Les joints verticaux sont donc essentiellement soumis à des efforts tangents.

En revanche, les joints horizontaux sont soumis, non seulement à des efforts tangents, T, d'intensité moyenne voisine de celles des précédents (en vertu du théorème de Cauchy) mais aussi à des efforts normaux importants, N, dûs :

- au poids propre du bâtiment et à ses surcharges verticales,
- mais aussi à la flexion générale que subit le bâtiment, sous l'action des surcharges horizontales.

Ces joints horizontaux, que comporte toute construction préfabriquée à plusieurs étages risquent d'en constituer les parties les plus fragiles.

Leur étude présente donc une grande importance pratique. Elle ne peut guère être menée que de façon expérimentale, car la répartition des contraintes dans les joints est assez complexe pour que les règles de leur comportement échappent, au moins pour l'instant, à une rigoureuse analyse théorique.

C'est la raison pour laquelle a été engagée la présente série d'essais, qui ont été effectués du 22 mars au 19 mai 1971, au Centre d'Essais des Structures de Saint-Rémy-lès-Chevreuse. Cette recherche qui a été financée par l'UTI constituait le sujet de la thèse de docteur-ingénieur menée par Primo CORTINI, sous le haut patronage de M. SIESTRUNCK, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris.

1,2 - Etat des recherches expérimentales antérieures.

1,21 - A notre connaissance, aucune recherche expérimentale importante n'a été, jusqu'à présent, effectuée sur le comportement des joints horizontaux.

1,22 - En revanche, les joints verticaux, c'est-à-dire simplement cisaillés ont donné lieu à de nombreuses recherches dont la plus importante nous semble avoir été menée au Centre d'Essais des Structures, de 1964 à 1971, par MM. J.R. ROBINSON et M. POMMERET, et dont les résultats (relatifs à 215 essais) viennent d'être publiés avec l'aide efficace de P. HEUDE, ingénieur CHEBAP et de J.P. AUDOUSSET, de la Division Calcul du C.E.B.T.P. [Réf. 1]

Ces essais ont permis de constater que les joints, soumis à un effort tangent T, s'ouvraient progressivement, ce qui provoquait la mise en traction de leurs armatures transversales.

Mais, comment se combinent, dans les joint horizontaux cet effort de traction, d'une part, et l'effort normal extérieur N, d'autre part ?

1,23 - Par ailleurs, 2 essais commerciaux effectués en 1971, au Centre d'essais des Structures, sur des joints proposés par une entreprise de bâtiment ont montré que si les joints sont munis de crans trapézoïdaux dont les faces obliques sont inclinées à 45°, la rupture peut se produire rapidement, avec chevauchement des 2 faces du cran, qui glissent en montant l'une sur l'autre [réf.2 D'où l'idée que le coefficient de frottement entre 2 bétons séparés par une surface de reprise lisse peut descendre en dessous de l'unité. Qu'en est-il exactement ?

1,24 - Enfin, dans le cas où les joints simplement cisaillés sont crantés, la rupture survient en général par cisaillement du béton des crans. Mais la formulation de la valeur de l'effort de rupture est encore bien indécise, car elle semble ne pouvoir avoir d'autre source qu'empirique (comme d'ailleurs dans la plupart des phénomènes où l'effort tranchant prend une part prépondérante). Qu'en est-il pour les joints horizontaux, soumis de surcroît à un effort normal ? Les Recommandations Internationales Unifiées à cet égard [Réf. 3] peuvent sembler timides et elles n'ont pas donné lieu à vérification expérimentale.

2 - PARAMETRES DES ESSAIS.

Les essais ont porté sur 15 corps d'épreuve, dans lesquels on a seulement fait varier les 3 paramètres suivants :

a - L'effort normal N, dont la valeur maximale appliquée correspond à une compression moyenne voisine de 37,5 kg/cm2, et donc au cas d'un immeuble de plus de 15 étages.

b - L'aire, B, des crans, pour les joints qui en disposent.

c - L'absence ou la présence d'armatures de couture

Le tableau 1 donne les valeurs adoptées pour ces paramètres dans les pièces soumises à essai.

3 - DESCRIPTION ET EXECUTION DES CORPS D'EPREUVE.

3,1 - Généralités.

Les corps d'épreuve sont composés de 3 parties (fig. 1 à 3) :

a - deux bordures simulant les 2 panneaux préfabriqués. Chaque bordure est haute de 24 cm, épaisse de 18 cm, et longue de 250 cm. Elle est fortement armée et de plus raidie par l'ensemble de 2 couples de poutres métalliques latérales extérieures (appelées ci-après "consoles") auxquelles elle est fixée par boulons HR. Sa déformabilité peut être considérée comme voisine de celle d'un panneau réel.

b - Le joint proprement dit, qui assure la liaison entre les 2 bordures. Il est haut de 16 cm, épais de 12 cm, et long de 150 cm.

L'épaisseur des pièces est donc nettement plus faible que celle des joints verticaux précédemment essayés au C.E.S. [Réf. 1] (soit 12 cm contre 18 cm) mais beaucoup plus proche de celle rencontrée dans la pratique actuelle.

3,2 - Exécution des corps d'épreuve.

Les bordures sont bétonnées dans un coffrage composé :

a - de 2 joues latérales métalliques

b - d'un fond en contre plaqué huilé pour la face qui sera en contact avec le joint. La reprise de bétonnage est ainsi lisse, mais non "glacée".

14 jours après, les 2 bordures sont disposées face à face sur une même aire horizontale. Le joint est bétonné entre elles. La pièce est essayée 14 jours ensuite.

3,3 - Caractéristiques mécaniques des bétons :

3,31 - Le béton des bordures, dosé à 400 kg de ciment et 160 litres d'eau par m3 a une résistance moyenne à la compression de 450 kg/cm2.

3,32 - Le béton des joints est dosé à 275 kg de ciment CPAL et 195 à 200 l d'eau par m3. Ses agrégats, silico-calcaire, ont une dimension maximale de 16 mm. Son affaissement, au cône d'Abrams varie de 4,5 à 9 cm. Sa résistance à la compression mesurée sur cylindres (Ø = 16, H = 32 cm) vaut en moyenne 197 Kg/cm2 (avec un écart-type de 10 %) . Sa résistance à la traction, mesurée par flexion de prismes 7 x 7 x 35 cm, vaut en moyenne 17,3 kg/cm2 (avec un écart-type de 9,5 %).

3,4 - Types de joints soumis à l'essai.

Les 15 pièces essayées diffèrent essentiellement

a) par la nature des surfaces de reprise entre les 2 bordures et le joint, et qui a été

- tantôt plane (joints "lisses")
- tantôt munie de crans (joints "crantés" : cf § 3,5).

b) par la présence ou non d'armatures de couture entre les bordures et le joint (cf § 3,6).

Quatre types de joints ont été essayés.

Types de joints	Corps d'épreuve n°
lisses non armés	1, 2, 3, 13 et 14
lisses armés	4 et 15
crantés non armés	6, 9, 11 et 12
crantés armés	5, 7, 8 et 10

3,5 - Joints crantés.

3,51 - Chaque cran est un prisme trapézoïdal de 2 cm de hauteur dont la grande base (côté joint) est longue de 8,3 cm et dont les facettes obliques sont inclinées de 60° sur l'horizontale (figure 4).

L'aire de la grande base du cran vaut donc 12 x 8,3 = 100 cm2.

Ces dimensions sont assez grandes pour que l'on soit assuré d'obtenir des crans en béton, et non en simple mortier.

3,52 - Les 3 joints n° 6, 7 et 8 comprennent, de part et d'autre, 3 crans, d'aire totale résistant au cisaillement sous l'action de l'effort tangent égale, par mètre de longueur du joint, à : $B = \frac{3 \times 100}{1,5} = 200$ cm2/m.l.

Dans ces joints (fig. 5), les crans sont, sur chaque face, espacés de 50 cm et disposés en quinconce d'une face à l'autre.

3,53 - Les 5 joints n° 5 et 9 à 12 comprennent, sur chaque face horizontale, 6 crans disposés en vis-à-vis, tous les 25 cm. L'aire des crans sur chaque surface de reprise vaut donc B = 400 cm2/m.l.

3,6 - Armatures des joints armés.

Les joints qui sont armés (n° 4, 5, 7, 8, 10 et 15) ont tous reçu le même ferraillage, (fig. 6) composé :

a - d'"armatures principales" transversales, totalement ancrées dans les bordures, et laissées en attente lors de la fabrication de celles-ci. Ce sont des boucles en acier doux de 8 mm de diamètre, au nombre de 5 par bordure.

Chaque plan de reprise des joints armés, long de 1,5 m, est donc traversé par une section d'acier égale, par mètre, à : A = 3,33 cm2/m.l.

Les boucles des 2 bordures en regard sont placées en contact.

Ces armatures ont été sélectionnées pour avoir des caractéristiques identiques : limite élastique : σ_e = 3380 kg/cm2, et contrainte de rupture égale à 4770 kg/cm2. L'effort de traction nécessaire pour amener les armatures principales à leur limite élastique vaut donc, par mètre de joint :
$A\,\sigma_e = 3,33 \times 3380 = 11260$ kg/m.l.

b - d'une armature secondaire longitudinale qui est une barre unique, en acier à haute adhérence (Tentor) de 15 mm de diamètre, pliée en forme de U, puis enfilée à l'intérieur des boucles après mise en place en regard des 2 bordures, juste avant le bétonnage du joint.

4 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL.

4,1 - Application de l'effort tangent : T.

Le dispositif d'application de l'effort tangent T comprend 2 "consoles" horizontales en acier, disposées l'une au dessus, l'autre en dessous du corps d'épreuve, auquel elle sont fixées par 10 boulons à haute résistance traversant les 10 fourreaux que comporte chaque bordure (fig. 2).

L'effort T est exercé par un vérin de 100 tonnes qui agit sur la "console" supérieure, dont la ligne d'action, horizontale, coïncide avec l'axe du joint et qui est alimenté par un dispositif servo-régulateur, et réglé par un dynamomètre à ressort AMSLER, servant à mesurer la valeur de T.

La "console" inférieure est fixée, au moyen de 2 x 5 tiges verticales précontraintes, à la plateforme d'essais, sans porter directement sur celle-ci de façon à obliger l'effort normal appliqué à transiter par la bordure inférieure.

4.2 - Application de l'effort normal N.

Un portique métallique, disposé à cheval sur le corps d'épreuve, sert à exercer l'effort normal N. Il reçoit un vérin de 100 tonnes, V_N , placé pour que sa ligne d'action, verticale, passe par le centre mécanique de la section horizontale du joint. Ce vérin est alimenté par un dynamomètre à pendule permettant de mesurer la valeur de N.

4,3 - Pièces annexes supérieures de répartition de l'effort normal N.

4,31 - Constitution.

Entre le vérin V_N et la bordure supérieure du corps d'épreuve est interposée une "pièce de répartition" de l'effort normal N, en béton fortement armé, et de dimensions (18 x 100 x 200 cm) qui permet la transmisaion de l'effort du vérin suivant un angle au plus égal à 30° sur la verticale.

Cette pièce de répartition a été posée à bain de mortier très fluide sur la bordure supérieure du joint, puis boulonnée à la "console" supérieure.

La tête inférieure du vérin V_N s'appuie sur la pièce de répartition par l'intermédiaire d'une plaque en acier qui, pour éviter un éventuel déversement latéral du système après rupture du joint, est reliée aux montants du portique par 2 tiges en acier, articulées et munies de "rondelles Belleville" sans être bloquées, de façon à autoriser le glissement longitudinal du joint.

Les longueurs des tiges, d'une part, et du bras du vérin, d'autre part, sont assez grandes pour que leurs rotations soient négligeables (même pour un glissement du joint voisin de 2 cm) et qu'elles n'influent donc pratiquement pas sur le phénomène étudié.

4,32 - Réglage du centrage mécanique de l'effort normal N.

Avant chaque essai, on a fait coïncider le point d'application du vérin V_N avec le centre mécanique de la surface horizontale du joint, en égalisant les déformations transversales (verticales), mesurées par jauges, de 3 sections du joint, sous l'effet d'un effort N au moins égal à 3 tonnes.

4,4 - Appui des bordures inférieures des corps d'épreuve.

Pour éviter que l'effort normal N ne passe directement du joint à la plateforme d'essais, par l'intermédiaire de la "console" inférieure, on a empêché que cette dernière ne s'appuie directement sur la plateforme, en interposant entre celle-ci et la bordure inférieure du corps d'épreuve, 2 "pièces d'appui" en béton armé, posées à bain de mortier liquide, et fixées par boulonnage à la "console" inférieure. La bordure inférieure du corps d'épreuve a été posée à bain de mortier sur les pièces d'appui, avec interposition d'une feuille de cellophane pour éviter tout bridage.

Le poids des pièces surmontant le joint, et dont il a été tenu compte dans la valeur de l'effort normal N appliqué, vaut 2270 kg (soit 1510 kg/m).

4,5 - Mesure des déplacements.

Pour chaque corps d'épreuve, on a mesuré les déplacements relatifs des 2 bordures :

- dans le sens longitudinal ("glissement" relatif horizontal : g)
- dans le sens transversal ("ouverture" totale du joint : δ),

au moyen :

- d'un capteur électrique fixé au milieu de la face nord du joint, (fig. 15) et qui, associé à un enregistreur électronique monté sur le dynamomètre, a permis d'enregistrer la courbe "effort tangent T - glissement" entre les 2 bordures.

- de 5 couples de comparateurs fixés sur la bordure inférieure, et palpant la bordure supérieure, dans les directions longitudinale, d'une part, et verticale, d'autre part de façon à mesurer le glissement et l'ouverture du joint. 2 de ces couples ont été disposés sur la face nord (fig. 16) et 3 sur la face sud (fig. 18).

5 - EXECUTION DES ESSAIS.

Préalablement à l'essai, nous avons volontairement fissuré les reprises de bétonnage, situées de part et d'autre du joint, car :

- dans les bâtiments réels, ces reprises peuvent se fissurer par suite du retrait du béton du joint
- le "collage" des bétons, des bordures, d'une part, et du joint, d'autre part, exerce un effet favorable mais tellement aléatoire que la dispersion des résultats alors obtenus interdit toute interprétation.

Cette ouverture préalable du joint, de 0,2 mm environ, a été effectuée au moyen de 3 vérins disposés sur chaque face du joint (fig. 7).

Pour tous les joints, autres que les n° 13 et 14, l'effort normal définitif, N a été appliqué dès le début de l'essai, et il est ensuite resté constant, jusqu'à la rupture.

L'effort tangent T a été ensuite exercé, par paliers statiques croissants, de pas égal au cinquième de la valeur de la charge de rupture estimée.

Chacun des joints 13 et 14 a été, en revanche, essayé successivement sous 3 efforts normaux différents (a, b et c). Dans chaque phase, l'effort tangent a été ramené à zéro dès que le comportement du joint devenait régulier, c'est-à-dire quand le glissement g atteignait environ 5 mm.

Au total, nous avons donc procédé à 13 + 2 x 3 = 19 essais.

6 - RESULTATS EXPERIMENTAUX.

6,1 - COURBES :"EFFORT TANGENT : T - GLISSEMENT : g"

6,11 - Généralités.

Toutes les courbes enregistrées par capteur électrique présentent une allure analogue et semblable à celles des joints verticaux simplement cisaillés [Réf. 1] soit :

- montée très rapide de T jusqu'à une valeur maximale T_u , obtenue pour une valeur de glissement relatif g_u . L'etat correspondant à l'atteinte de cette valeur maximale de l'effort tangent sera dénommé ci-après : "ultime".

- puis, en général, une décroissance assez rapide de T, la rupture totale du joint ne se produisant qu'après un glissement important, supérieur à 9 mm.

Mais à chacun des 4 types de joints essayés correspond un type de courbe (T, g) original.

6,12 - Joints lisses non armés (fig. 8).

a - Le glissement g_u est très faible, compris entre 0 et 0,2 mm. Après atteinte de l'effort tangent maximal T_u, la valeur de T redescend et se stabilise à une valeur à très peu près constante : T_f. Nous sommes alors manifestement en présence d'un mécanisme de frottement, de coefficient $f = \frac{Tf}{N}$.

b - Les diagrammes (T, g) des joints lisses soumis aux efforts normaux les plus importants (joints 1 à 3 et 13) présentent des "hoquets" réguliers, dûs au montage expérimental et dont nous retenons l'ordonnée minimale comme valeur de T_f. Or, certains enregistrements ont connu une dérive qui est due à la mollesse du stylet d'enregistrement et qui a entrainé une diminution régulière progressive de cette valeur minimale. Puisqu'alors, il fallait choisir, nous avons adopté pour T_f la première valeur obtenue, à l'orée de la phase de comportement régulier du joint considéré. La définition de T_f implique ainsi un choix, et a donc un certain caractère arbitraire.

6,13 - Joints lisses armés (fig. 9).

Les courbes (T, g) présentent une allure analogue, mais avec toutefois une remontée de T peu avant que ne survienne la rupture totale du joint.

6,14 - Joints crantés non armés (fig.10).

L'effort tangent atteint sa valeur maximale T_u pour une valeur de glissement g_u bien plus élevée, puisque voisine du millimètre.

L'état ultime est obtenu par cisaillement des crans. La valeur de T diminue alors brusquement jusqu'à se stabiliser pour un glissement supérieur à 10 mm. Ceci est dû au lissage progressif des débris introduits dans les surfaces de reprise par suite de la rupture des crans.

6,15 - Joints crantés armés (fig. 11).

Leur comportement ressemble à celui des joints crantés non armés. Mais après atteinte de la valeur maximale T_u, l'effort tangent T décroît moins vite et il réaugmente même à nouveau (hormis le joint 10) avant la rupture qui ne survient qu'après un glissement considérable, compris entre 15 et 20 mm.

6,2 - VALEURS CARACTERISTIQUES DES EFFORTS.

Le tableau suivant résume les principaux résultats expérimentaux et notamment les valeurs des efforts caractéristiques T_u, T_f et N exprimés en kgf/m.l. de joint.

TABLEAU I

Effort normal N (kg/m)				3 330	5 630	11 260		22 530		33 790	45 050	
Joints lisses	non armés	n°	-	14 a	14 c	14 b	1	(2) (2)	13 b	13 a	13 c	3
		T_u (kg/m)	-	7 070	5 870	8 330	16 800	(10 400)	21 670	30 000	33 330	30 000
		T_f (kg/m)		2 750	4 170	8 330	7 370	(9 330)	14 730*	23 070	30 000	27 000
	armés (1)	n°	-	-		4	15	-		-	-	
		T_u (kg/m)	-	-		24 000	15 070	-		-	-	
		T_f (kg/m)				16 500*	14 530*					
Joints crantés	B (cm^2/m)		400	-		200	400	400		200	400	
	non armés	n°	-	-		6	9	11		-	12	
		T_u (kg/m)	-	-		20 000	24 530**	35 000***		-	49 000	
	armés (1)	n°	5	-		7	10	-		8	-	
		T_u (kg/m)	25 000**	-		28 330	35 000***	-		46 470	-	

(1) Pour tous les joints armés, A σ_B = 3,33 x 3380 = 11 260 kg/m

(2) A éliminer : cf § 7,21

* Les étoiles désignent les corps d'épreuve ayant mêmes valeurs de (N + A σ_B)

6,3 - FISSURATION DES JOINTS AVANT RUPTURE.

6,31 - Joints lisses non armés.

En dehors de phénomène d'about, aucune fissure autre que celles affectant les surfaces de reprise ne s'est formée dans les joints lisses non armés.

6,32 - Joints lisses armés.

Des fissures verticales se sont produites au droit des armatures principales (fig. 11) Ces boucles exercent en effet sur le béton des poussées centripètes qui, ne trouvant pas un appui suffisant par frottement sur les bordures pour équilibrer leur composante horizontale, provoquent le fendage du béton suivant son plan le plus faible : celui de la boucle (fig. 13).

6,33 - Joints crantés :

Leur fissuration est très fortement influencée par la position relative des crans sur les 2 faces en regard. Considérons le cran (i) dont la grande base (côté joint) est $a_i\ b_i$, l'arête a_i étant directement attaquée par l'effort tangent T (figure 14).

a - Dans le cas des joints présentant des crans en regard (B = 400 cm2/m) appelons $a'_i\ b'_i$ le cran situé en face du cran $a_i\ b_i$ et relevons les inclinaisons des fissures par rapport à l'axe longitudinal du joint. A partir de a_i peuvent s'amorcer 3 familles de fissures obliques dans le joint ;

- l'une, se dirigeant vers b'_i , est inclinée de α = Arc tg $\left(\frac{16}{8,3}\right)$ = 62°30' (ex : figure 15).
- l'autre se dirigeant vers a'_{i+1} , est inclinée de β = Arc tg $\left(\frac{16}{25}\right)$ = 32° 30' (ex. figure 16).
- la dernière, enfin, inclinée d'un angle γ qui dépend de l'état de sollicitation (N, T) du joint (ex. figure 17).

b - Dans le cas de crans disposés en quinconce (B = 200 cm2/m), il peut s'amorcer à partir de a_i 2 familles de fissures inclinées soit de β , soit de γ (ex. figure 18).

c - De plus, et dans tous les cas, il peut se former à la base des crans, de multiples fissures inclinées (fig. 18) qui dévient ensuite suivant la base a_i b_i du cran, jusqu'à se relier, et provoquer la rupture du cran, par cisaillement-compression (fig. 17).

6,4 - OUVERTURE DES JOINTS

6,41 - Généralités.

La valeur de l'ouverture δ des lèvres des reprises de bétonnage, entre le joint et ses 2 bordures, a été mesurée en 5 points. Elle varie considérablement le long du même joint, ce qui prouve que ce dernier subit d'importantes distorsions. Nous ne traitons ci-après que de la valeur moyenne de δ, établie sur les 5 bases de mesure.

6,42 - Joints lisses.

Sous l'action combinée de N et de T, les reprises de bétonnage, préalablement ouvertes, tendent à se refermer. Ce n'est que peu avant l'état ultime que les joints lisses armés s'ouvrent à nouveau. Mais aucune mesure directe n'ayant été effectuée sur leurs armatures, nous n'avons pas la preuve absolue de leur plastification lors de l'atteinte de l'état ultime.

6,43 - Joints crantés.

a - Chaque joint s'est progressivement ouvert, comme le montre la figure 19. A l'état ultime, l'ouverture moyenne est considérable : de l'ordre de 0,1 mm pour les joints non armés, et de 0,25 mm pour les joints armés.

En ce dernier cas, les armatures principales sont plastifiées à l'état ultime, comme l'ont prouvé les jauges à fil résistant qui ont été collées sur celles des joints n° 5 et 10, près du plan de reprise supérieur, côté bordure. Dès lors, on peut attribuer la remontée finale des courbes (T, g) de ces joints au "raffermissement" de l'acier de leurs armatures, qui suit leur palier d'écoulement plastique.

b - L'importance des ouvertures δ observées pourrait faire croire que chaque bordure tend, en glissant par rapport au joint, à le chevaucher suivant la facette oblique de chaque cran qui est directement attaquée par l'effort tangent. Un tel déplacement est indéniable. Mais la figure 20 montre que le glissement horizontal (g) est toujours fortement supérieur à la valeur (δ cotg 60°) qui correspondrait au simple chevauchement des lèvres du joint.

En réalité, l'ouverture des lèvres du joint est essentiellement due à la cause suivante, mise en évidence par les fissures décrites au § précédent : les crans constituent des butées qui bloquent le glissement relatif des 2 bordures et du joint, et où se concentre, par conséquent, la transmission de l'effort tangent entre ces 3 éléments. Sous cette action se forment, dans le béton du joint, des bielles comprimées qui relient les facettes obliques des crans, d'une surface de reprise à l'autre. Ces bielles se matérialisent par les fissures relevées au § précédent, à leurs extrémités, où elles sont les plus sollicitées. Dès lors, ces bielles fléchissent et pivotent sous l'action de l'effort tangent : en s'arc-boutant sur les bordures, elles forcent celles-ci à s'écarter, dans le sens vertical.

Cette flexion, inévitable quand une armature principale n'est pas disposée juste au droit du cran, engendre des tractions dans les bielles qui se fissurent à la base des crans, puis s'écrasent en compression, ce qui provoque l'atteinte de l'état ultime du joint.

7 - INTERPRETATION DES RESULTATS DES ESSAIS : PREVISION DE LA VALEUR CARACTERISTIQUE DE L'EFFORT TANGENT DES JOINTS :

7,1 - Définition des valeurs caractéristiques des efforts tangents.

7,11 - Joints lisses.

a - Les joints lisses présentent des valeurs ultimes d'efforts tangents, T_u extrêmement dispersées, malgré la fissuration préalable des joints. Ainsi, pour des couples de joints apparemment identiques (n° 1 et 14 b, d'une part ; n° 3 et 13 c, d'autre part) les valeurs obtenues pour T_u varient de 6% à plus de 100 %.

b - En revanche, la valeur de l'effort T_f est fonction régulière des paramètres étudiés. C'est donc cette valeur qui semble le mieux caractériser la résistance des joints lisses. C'est elle que nous retiendrons donc ci-après. Cela va d'ailleurs dans le sens de la sécurité, puisque le rapport T_f/T_u varie de 0,4 (joint n° 14 a) à 1,0 (joint n° 3).

c - Le fait que T_u dépasse T_f malgré la fissuration préalable des joints semble pouvoir être attribué à l'existence des "micros-crans" constitués par les petites cavités qui apparaissent dans les bordures lorsqu'elles sèchent, et qui sont ultérieurement remplies par le mortier du joint.

En présence d'un effort normal, les bordures ne peuvent glisser sur le joint qu'après avoir cisaillé ces "micro-crans", comme nous avons pu l'observer sur certains corps d'épreuve. L'atteinte de T_u correspond au cisaillement total de ces "micro-crans". Ensuite, le mécanisme de frottement, relevé au § 6,12 prend le relais.

7,12 - Joints crantés :

Ce sont, au contraire, les valeurs ultimes T_u des efforts tangents qui caractérisent le mieux la résistance des joints crantés.

7,13 - Remarque :

On remarquera que ces valeurs caractéristiques des efforts tangents (T_f pour les joints lisses et T_u pour les joints crantés) sont atteintes pour des valeurs de glissement importantes, et sensiblement du même ordre de grandeur, soit : de 1 à 2 mm.

7,2 - Equivalence de l'effort normal N et de l'effort $A\sigma_e$

Tous les résultats expérimentaux essentiels relatifs, soit aux valeurs caractéristiques de l'effort tangent (T_f pour les joints lisses et T_u pour les joints crantés), soit au glissement (g) montrent l'équivalence qui existe entre :

- l'effort normal extérieur : N
- et l'effort de traction des armatures principales (de section A) tendues à leur limite élastique (σ_e), soit : $A\sigma_e$

C'est la somme de ces 2 efforts normaux, qui tendent tous deux à comprimer le béton du joint, qu'il faut considérer pour analyser le comportement des joints horizontaux, soit : $N + A\sigma_e$

Le tableau II suivant montre, en particulier, que les valeurs caractéristiques de l'effort tangent sont très comparables pour la même valeur totale de l'effort normal, quelle que soit son origine (N ou $A\sigma_e$), toutes choses égales par ailleurs.

Les groupes de joints à comparer, encadrés par des cartouches, sont respectivement les suivants : (4,15 et 13 b) ; (5 et 9) ; (10 et 11). Les joints armés ont leur numéro complété par une étoile. Les efforts sont exprimés en kg/m.l.

TABLEAU II

$N + A\sigma_e$			3 330	7 630	11 260		22 530			33 790	45 050	
Joints lisses	n°		14 a	14 c	14 b	1	13 b	4*	15*	13 a	13 c	3
	T_f		2 750	4 170	8 330	7 370	14 730	16 500	14 530	23 070	30 000	27 000
	$f = \frac{T_f}{N + A\sigma_e}$		0,82	0,74	0,74	0,65	0,65	0,73	0,64	0,68	0,67	0,60
Joints crantés	B = 200 $cm^2/m.l.$	n°	-		6		7*			-	8*	
		T_u	-		20 000		28 330			-	46 470	
	B = 400 $cm^2/m.l.$	n°	-		5*	9	10*	11		-	12	
		T_u	-		25 000	24 530	35 000	35 000		-	49 000	

7,3 - Résistance des joints lisses : mécanisme de frottement béton sur béton.

7,31 - Les diagrammes (T, g) montrent qu'après avoir dépassé l'effort tangent ultime T_u, les joints lisses, armés ou non, fonctionnent suivant un mécanisme de frottement entre le béton des bordures et celui du joint. Les valeurs mesurées du coefficient de frottement mutuel, $f = \frac{T_f}{N + A\sigma_g}$, données par le tableau II ont une moyenne de 0,70 (avec un écart-type de 6 %), ce qui correspond à un angle de frottement : Arc tg 0,7 = 35°, très proche de celui (37°) qui est souvent adopté aux Etats Unis pour caractériser la courbe intrinsèque du béton, à la suite des travaux de Zia.

7,32 - La constance de cette valeur, que les joints soient armés ou non, rend bien sceptique quant à l'"effet de goujon" que peuvent exercer les armatures au delà de l'état ultime.

7,33 - Mais il faut surtout retenir que la valeur mesurée du coefficient de frottement f est nettement plus faible que celles qui sont couramment retenues par les bureaux d'étude, et notamment la valeur : $f = 1,0$ qui est la base de la théorie classique du découpage du béton cisaillé en bielles inclinées à 45° (treillis de Mörsch, ou règle des coutures de Robinson). Une telle hypothèse de calcul se situerait nettement du côté de l'insécurité dans le cas où les surfaces de reprise sont moulées dans des coffrages lisses, comme c'est l'usage en préfabrication. Cela pourrait expliquer le fort"coefficient de comportement" adopté pour les charges ($\gamma_q = 2,65$) par les Recommandations Internationales [réf. 3]

7,34 - La faiblesse de la valeur de f entraine par ailleurs une conséquence importante sur le dessin à donner aux joints crantés : les flancs obliques de leurs crans doivent recevoir une inclinaison sur la section droite assez faible (inférieure à 35°) pour éviter que les panneaux ne glissent mutuellement, en s'écartant, dès que les reprises de bétonnage sont fissurées.

7,4 - Résistance des joints crantés

7,41 - Généralités.

Il ne paraît guère possible de calculer la répartition exacte des contraintes dans un joint cranté. Un tel calcul serait déjà d'une extrême complexité si les matériaux obéissaient à la théorie de l'élasticité. Les micro-fissurations plus ou moins aléatoires et les plastifications locales qu'y connaissent les bétons constitutifs le rendent quasiment impossible.

On ne peut pas davantage espérer mesurer expérimentalement ces contraintes de façon précise, car les bases de mesure à employer ont une longueur minimale de l'ordre de 5 cm, de façon à intégrer aussi bien les déformations des agrégats et du mortier, que l'influence éventuelle des armatures situées à proximité, etc... Cette longueur est beaucoup trop importante vis-à-vis des dimensions des crans pour permettre de recueillir des mesures ponctuelles de déformations, et donc de contraintes.

L'estimation du comportement des joints crantés ne peut donc se faire que sur la base de valeurs moyennes d'efforts ou de contraintes. Il faut tenter de l'exprimer sous une forme aussi logique que possible, suivant un des schémas mécaniques couramment utilisés par les bureaux d'études (méthodes des bielles, courbe intrinsèque, etc...) ou, dans le cas où ces schémas seraient manifestement erronés, sous une formulation purement empirique.

7,42 - Confrontation des résultats des essais avec la théorie du treillis.

a - Cette théorie suppose que le joint est découpé en bielles comprimées, inclinées de Θ sur l'horizontale, et dont les poussées mettent les armatures en traction, ce qui se traduit, à l'état ultime, par la règle des coutures :

$$\operatorname{tg}\Theta = \frac{N + A\sigma_e}{T}$$

b - Les Recommandations internationales recommandent d'adopter suivant la tradition du béton armé : $\Theta = 45°$, soit : $\operatorname{tg}\Theta = 1$. Cela est très conservatif, c'est-à-dire coûteux en armatures, puisque dans les 8 joints essayés, la valeur de $\operatorname{tg}\Theta$ varie de 0,48 (n° 5) à 0,97 (n° 8) seulement (fig.21)

Cela serait d'ailleurs encore pis, si pour tenir compte en toute logique de l'effort de compression verticale N, on suivait les errements du béton précontraint [soit : $\Theta = \frac{1}{2}\operatorname{Arc\,tg}\frac{N}{2T}$, et $T = \sqrt{A\sigma_e\,(A\sigma_e + N)}$] : il faudrait encore augmenter les armatures "principales" car les fissures, tendant alors à se redresser sur la verticale, intéresseraient moins d'armatures que dans le cas où N = 0.

c - Mais les essais montrent bien que la théorie du treillis ne permet absolument pas de témoigner du comportement ultime des joints. Cette schématisation signifierait en effet la proportionnalité entre l'effort tangent T_u et l'effort normal total $(N + A\sigma_e)$, ce que démentent totalement les essais, qui prouvent, au contraire, qu'en dehors de tout effort normal et de toute

armature (soit : $N + A\sigma_e = 0$) la résistance d'un joint cranté est loin d'être nulle. Les crans possèdent donc une résistance propre importante aux efforts tangents.

7,43 - Etude de l'hypothèse de la concentration de la résistance du béton du joint dans ses seuls crans :

L'importance des ouvertures mesurées, dans les joints crantés, entre les bordures en regard, pourrait inciter à croire qu'à l'état ultime, les surfaces de reprise se sont ouvertes entre les crans, et qu'en conséquence, l'ensemble des efforts appliqués (N et T) doit passer exclusivement par l'intermédiaire des crans.

Les surfaces de base des crans, d'aire B, seraient donc alors soumises à une contrainte moyenne de composantes normale : $\sigma = \frac{N + A\sigma_e}{B}$, et tangente : $\tau = \frac{T_u}{B}$. De plus agit sur un élément vertical de section droite une contrainte normale σ', engendrée par l'effort T mais dont la valeur est inconnue. Calculons les contraintes normales principales. Leurs valeurs absolues sont égales à :

$$\sqrt{\tau^2 + \left(\frac{\sigma - \sigma'}{2}\right)^2} \pm \left(\frac{\sigma + \sigma'}{2}\right)$$

Si σ' était négligeable, la traction principale varierait de 50 (joints 5 et 9) à 145 kg/cm2, pour le joint n° 8 (dont la compression principale vaudrait 370 kg/cm2). De telles tractions ne pourraient évidemment pas être supportées par le béton des crans.

Si σ' était assez élevée pour que la traction principale reste inférieure à la résistance du béton (soit au plus 20 kg/cm2), la compression principale varierait alors de 170 à 482 kg/cm2. Ses valeurs maximales dépassent trop fortement la résistance du béton des crans pour que ceux-ci ne se soient pas écrasés, même compte tenu de l'effet éventuel de frettage du joint par les bordures.

Ainsi, quelle que soit la valeur de la compression longitudinale du joint, l'hypothèse du transit des efforts exclusivement par l'intermédiaire des crans conduirait à des contraintes dans leur béton excessives soit en traction, soit en compression. Elle nous paraît, par conséquent, à abandonner.

7,5 - FORMULATION EMPIRIQUE DE LA RESISTANCE ULTIME DES JOINTS CRANTES.

7,51 - Les méthodes courantes de calcul, basées soit sur l'hypothèse de découpage du béton du joint en bielles, soit sur celle de la seule résistance du béton des crans, ne semblent donc pas permettre de rendre compte de la résistance ultime des joints crantés.

Nous en avons donc cherché, faute de mieux, une formulation purement empirique, aussi simple et d'apparence aussi logique que possible, pour en faciliter l'application éventuelle par les ingénieurs.

7,52 - En fonction des paramètres définis ci-dessus, la meilleure formule nous a paru la suivante :

$$T_u = 0{,}7\ (N + A\,\sigma_e) + 900\ \sqrt{B} \qquad (1)$$

où les efforts sont exprimés en kg/m.l., et l'aire B des crans, en cm2/m.l.

Mais cette expression est maladroite car elle conduirait à attribuer aux crans d'un joint d'épaisseur e, une résistance ne valant que $\sqrt{2}$ fois celle que l'on obtiendrait avec l'ensemble de deux demi-joints dont chacun aurait l'épaisseur e/2. Cela serait pour le moins surprenant.

Aussi préférons-nous présenter l'expression suivante, équivalente pour les joints soumis à l'essai:

$$\boxed{T_u = 0{,}7\ (N + A\,\sigma_e) + 2600\ e\sqrt{\frac{b}{t}}} \qquad (2)$$

où (fig.22) e est l'épaisseur du cran, c'est-à-dire, dans le cas présent, du joint, b la longueur de la base de chaque cran, et t l'espacement des crans (sur la même surface de reprise).

Dans cette formule, les efforts : T_u et $(N + A\sigma_e)$ sont exprimés en kg/m.l., et e en cm.

Le tableau suivant permet de comparer les valeurs expérimentales d'une part, et calculées suivant la formule (2) , d'autre part, de T_u.

$$\sqrt[n]{\quad}$$

B (cm2/m.l.)	200			400			
Joint n°	6	7	8	5	9	10 et 11	12
T_u exp. (kg/m)	20 000	28 330	45 050	24 530	25 000	35 000	49 000
T_u calc. (kg/m)	20 590	28 480	44 250	25 850		33 740	49 500
$\frac{T_u \text{ exp}}{T_u \text{ calc}}$	0,971	0,995	1,018	0,949	0,967	1,037	0,990

La moyenne du rapport entre les valeurs expérimentale et calculée vaut m = 0,995. Son écart-type, δ , est seulement de 3,2 %.

La formule proposée est donc en excellent accord avec les résultats des essais pratiqués sur les joints crantés.

7,53 - Du point de vue pratique, l'accord est d'autant plus heureux que cette formule s'adapte également aux joints lisses (pour lesquels : b = 0), sous réserve de considérer T_f , au lieu de T_u . La raison profonde de cette coïncidence, si elle existe, pourrait être que ces efforts correspondent tous à des valeurs de glissement du même ordre de grandeur (soit de 1 à 2 mm).

Le tableau suivant récapitule les formules proposées et les valeurs des moyennes m et des écarts-types δ qu'elles donnent par rapport aux valeurs expérimentales (en excluant la pièce aberrante n° 2).

Joints	Effort caractéristique par m.l.	m	δ (%)
crantés	$T_u = 0,7\ (N + A\sigma_e) + 2600\ e\ \sqrt{b/t}$	0,995	3,2
lisses	$T_f = 0,7\ (N + A\sigma_e)$	0,995	7,3
tous (soit 18 essais au total)		0,995	5,9

La figure 23 illustre ces résultats.

Les composantes normales σ et tangente τ de la contrainte moyenne agissant sur un plan horizontal du joint, à l'écart ultime, sont donc reliées par la relation :

$$\tau = 0,7\,\sigma + 26\sqrt{b/t} \qquad (3)$$

(où 26 est en kg/cm2).

7,54 - Néanmoins, rappelons que les formules précédentes ne sont qu'empiriques. Elles ne peuvent donc prétendre qu'à refléter le comportement des seuls joints essayés.

Le recours éventuel à ces formules pour d'autres joints ne peut être envisagé qu'avec la plus grande prudence.

Il est absolument évident, en particulier, que les paramètres suivants :

- résistance des bétons
- nature du coffrage des surfaces de reprise
- dimensions absolues des crans

jouent un rôle important sur les valeurs caractéristiques des efforts tangents, et influent donc certainement sur les valeurs des coefficients numériques (0,7 ; 2600), voire sur la forme, des expressions proposées.

L'analyse comparative et critique de tous les autres résultats d'essais obtenus devrait permettre d'éclaircir ce point qui sort du domaine de cette étude limitée.

Nous avons néanmoins cherché à voir si une formule du même type que la précédente pouvait s'appliquer aux joints crantés et armés de boucles précédemment essayés au Centre d'Essais des Structures par M. POMMERET (Réf.1).

Ces joints, au nombre de 81, relient des panneaux de 18 cm d'épaisseur. Les dimensions des crans varient : e de 6,8 à 18 cm et b de 5 à 24 cm. A σ_e varie de 2550 à 32000 kg/m.l. et B de 69 à 991 cm2/m.l. Certains ont été fissurés préalablement à l'essai, d'autres non. La résistance à la compression du béton du joint, mesurée sur cylindres, σ'_j varie de 160 à 255 kg/cm2.

La valeur de l'effort tangent ultime peut s'exprimer approximativement par la formule suivante :

$$T = 1{,}175 \; A\,\sigma_e + 0{,}105 \; e\sqrt{\frac{b}{t}\;\sigma'_j}$$

Les rapports entre valeurs : expérimentale, d'une part, et calculée suivant cette formule, d'autre part, ont une moyenne de 1,025 et un écart-type de 12,6 %.

8 - CONCLUSIONS.

8,1 - La rupture d'un joint horizontal entre grands panneaux préfabriqués de bâtiment, sous l'action d'un effort tangent longitudinal n'est pas du type fragile. Elle ne se produit qu'après de grandes déformations, notamment des glissements de plusieurs millimètres.

8,2 - Vis-à-vis de la résistance de tous les joints essayés, l'effort normal extérieur N, d'une part, et l'effort de traction des armatures verticales de couture tendues à leur limite élastique, d'autre part, semblent jouer le même rôle.

Les joints verticaux (N = 0) et horizontaux ont donc des comportements similaires.

8,3 - Pour les joints lisses, armés ou non, l'effort tangent atteint sa valeur maximale pour un glissement très faible (0,1 à 0,2 mm) et cette valeur est extrêmement dispersée. L'effort tangent se stabilise ensuite à une valeur T_f correspondant à l'apparition d'un mécanisme de frottement entre le béton des bordures et celui du joint, le long de leur surfaces de reprise. C'est la valeur de T_f qui semble le mieux caractériser la résistance des joints lisses. Le coefficient de frottement obtenu dans les présents essais ne vaut que 0,7.

8,4 - Munir les joints de crans permet d'augmenter sensiblement leur résistance, pourvu que leurs facettes obliques soient assez inclinées sur l'horizontale pour empêcher un glissement relatif prématuré par chevauchement des parties en jonction. C'est la valeur maximale, T_u, de l'effort tangent appliqué qui caractérise le mieux la résistance des joints crantés. Le mécanisme exact de rupture n'a pu être découvert. La méthode classique des bielles, ou celle basée sur la seule résistance des crans sont inexactes, et en pratique, défavorables.

8,5 - On propose finalement, mais avec prudence, la formule empirique (2), qui s'applique avec une très bonne précision, à l'ensemble de tous les joints essayés, sous réserve de considérer l'effort T_f pour les joints lisses, et T_u pour les joints crantés. Mais il est à remarquer que ces deux genre d'efforts sont atteints pour des glissements d'ordres de grandeur importants et comparables (soit de 1 à 2 mm.).

REFERENCES

[1] "La résistance aux efforts tangents des joints verticaux entre grands panneaux préfabriqués coplanaires", par POMMERET
Bulletin interne n° 3 du Service d'Etude des Structures - Juin 1971

[2] "Essais de résistance aux efforts tangents de 2 joints verticaux entre panneaux préfabriqués" par POMMERET
Annales de l'I.T.B.T.P. juin 1972

[3] "Recommandations Internationales Unifiées pour le calcul et l'exécution des structures en panneaux assemblés de grand format"
CEB-CIB

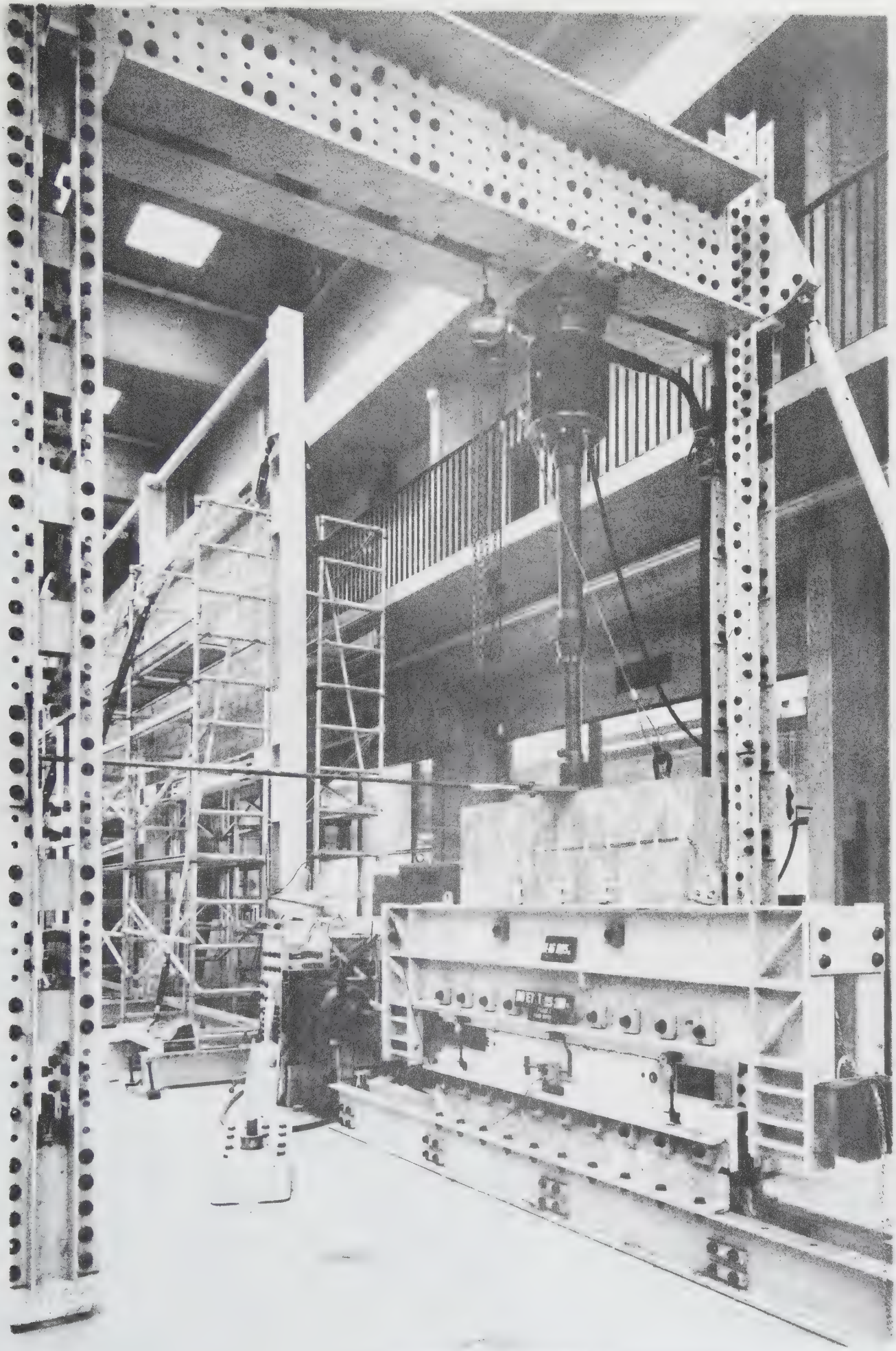


Fig. 1 - VUE D'ENSEMBLE DU DISPOSITIF D'ESSAIS.

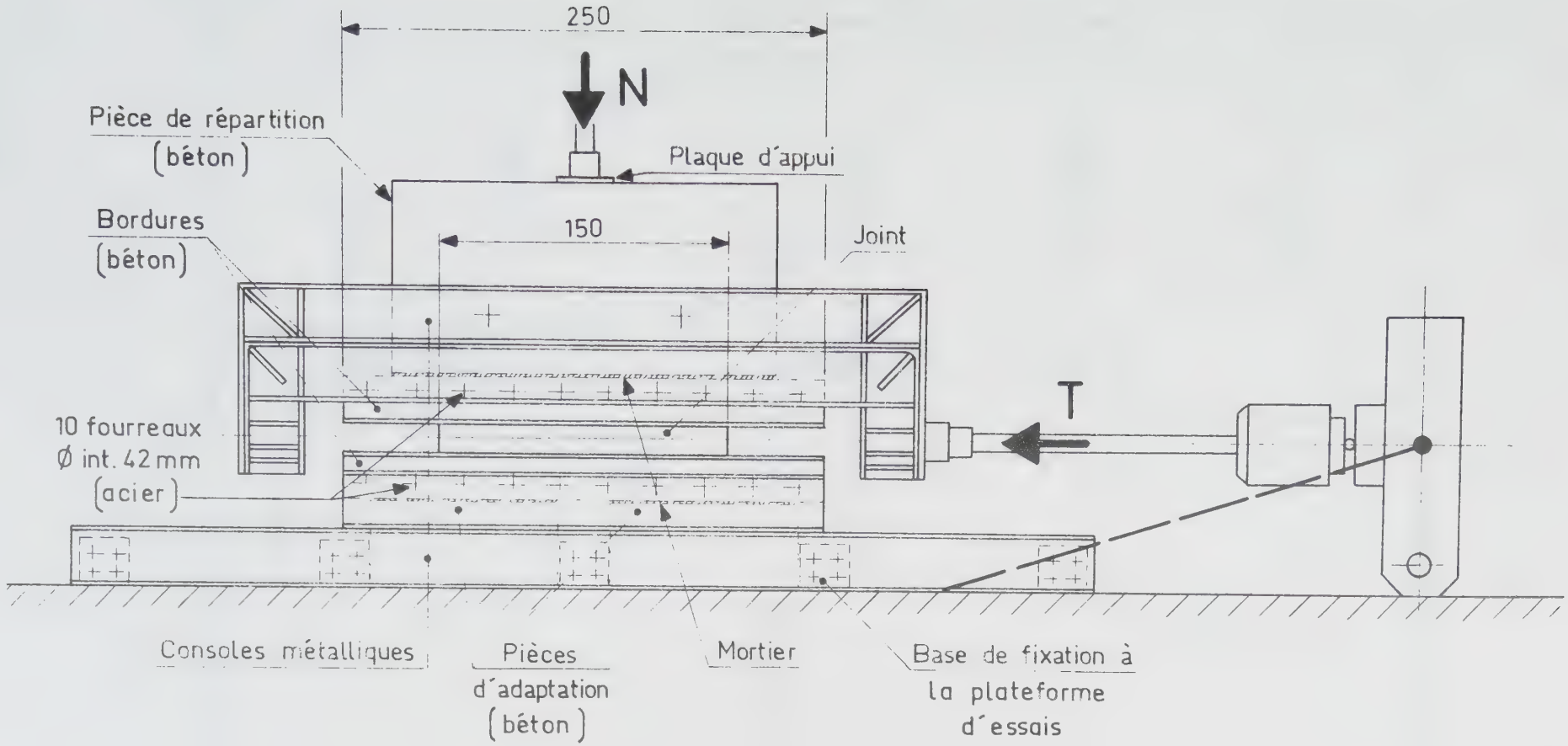


Fig. 2 - ELEVATION DU DISPOSITIF D'ESSAIS.

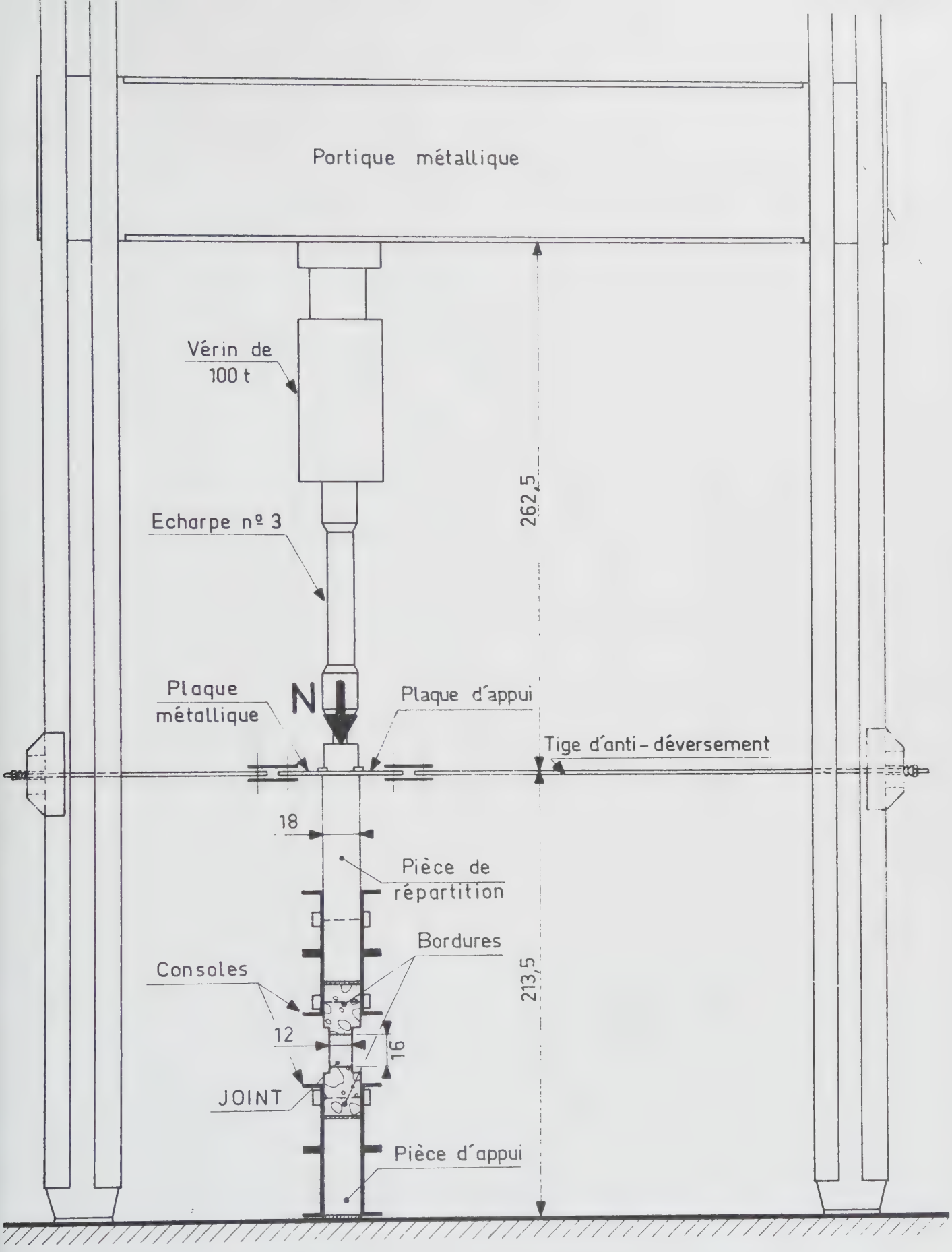


Fig. 3 - COUPE TRANSVERSALE DU DISPOSITIF D'ESSAI.

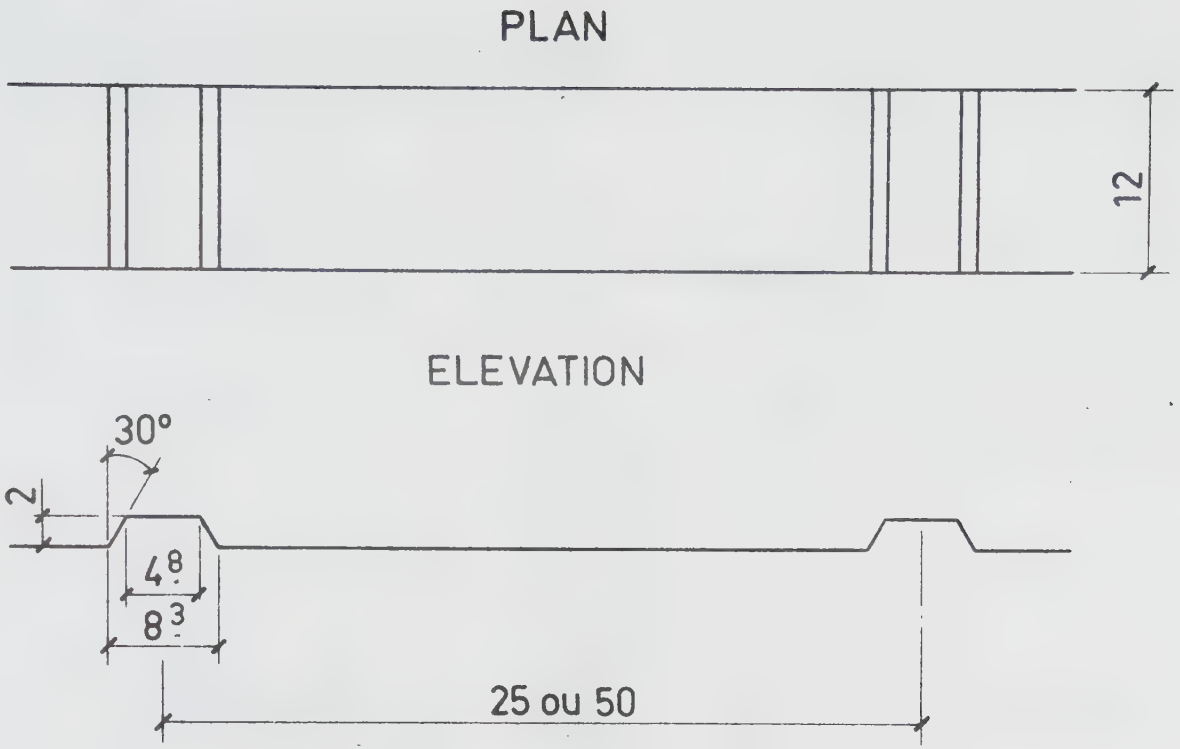


Fig. 4 - CRANS (cotes en cm)

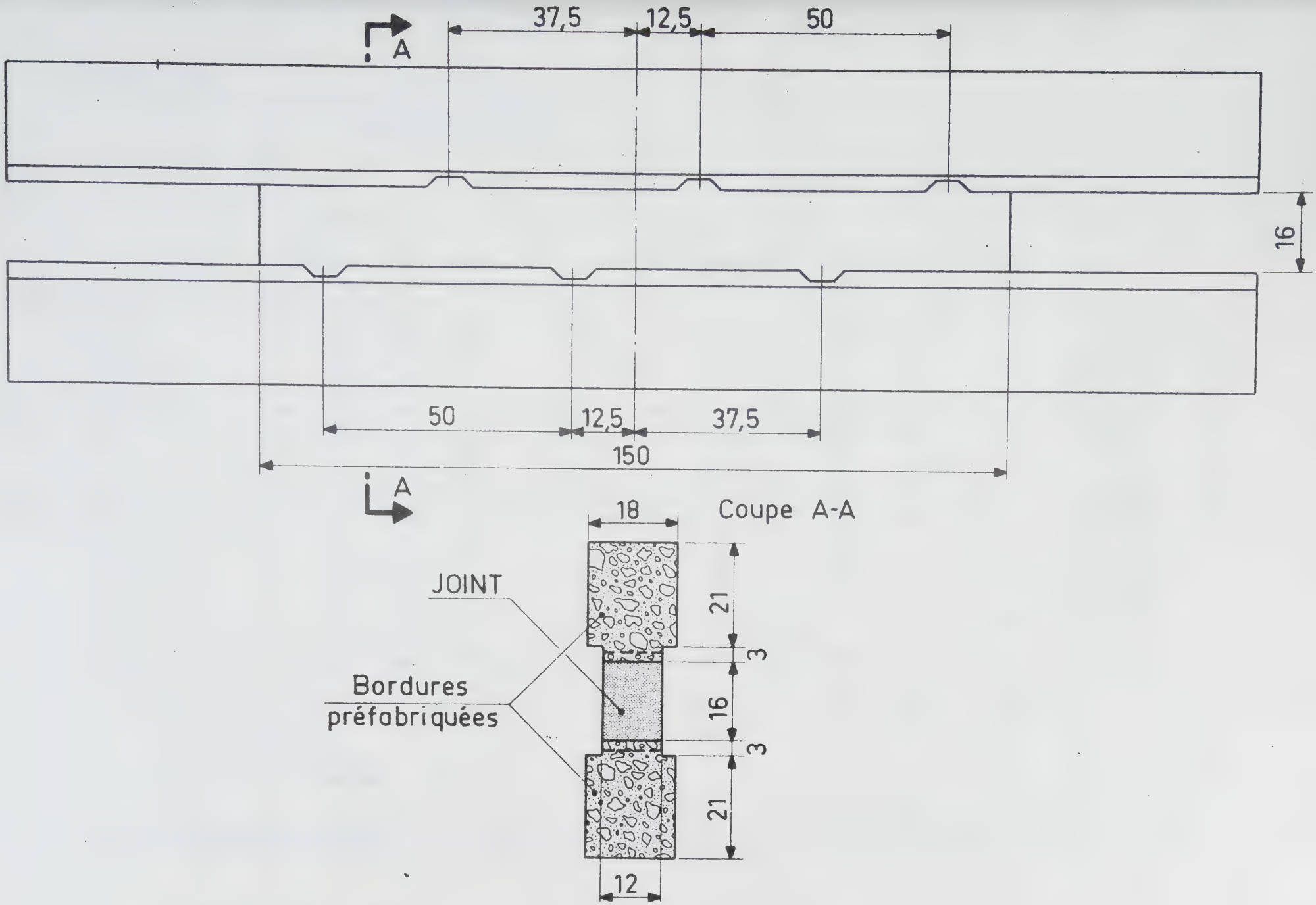


Fig. 5 - JOINT MUNI DE 3 CRANS (B = 200 cm2/ m)

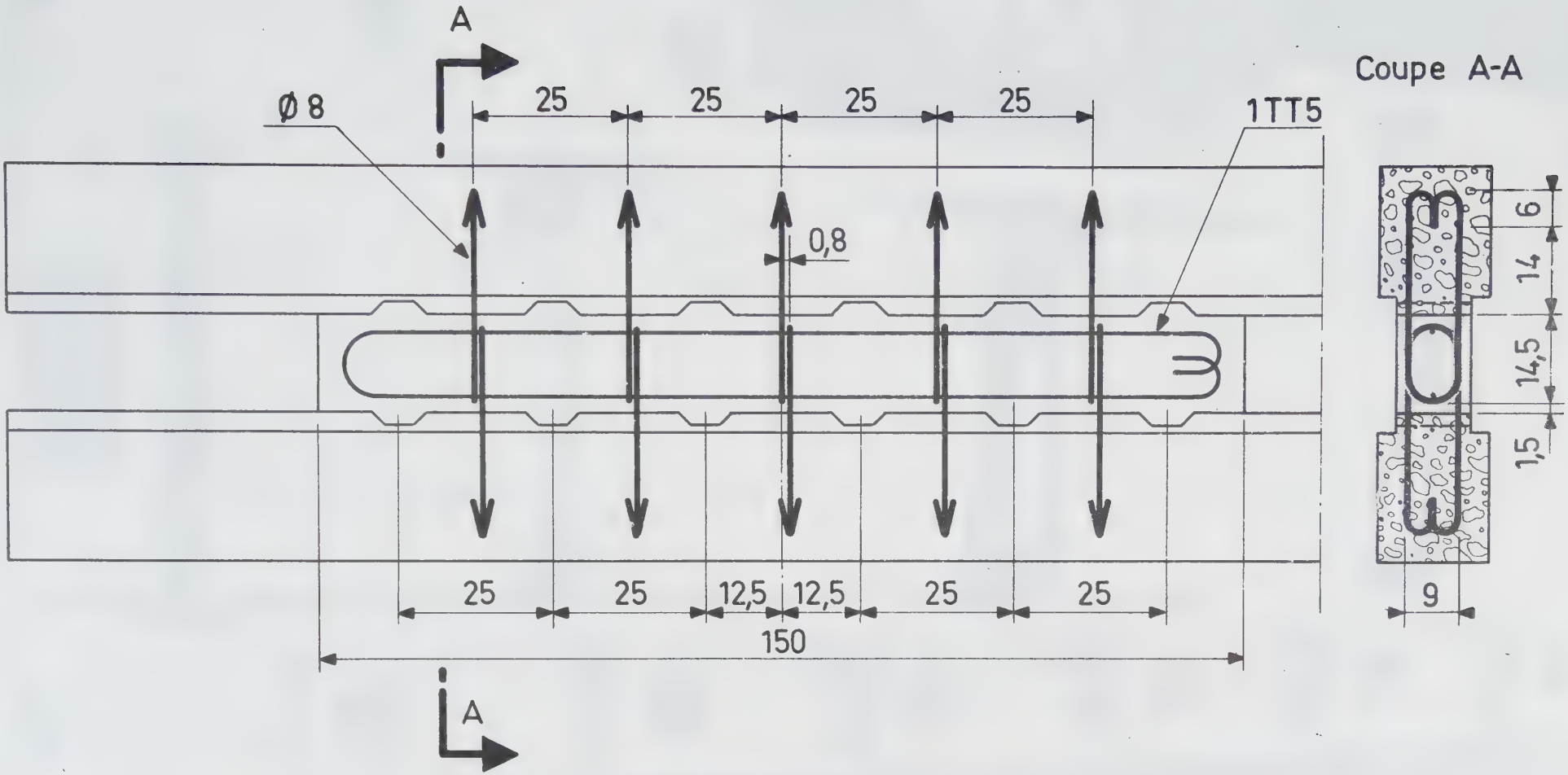


Fig. 6 - DISPOSITION DES ARMATURES (Exemple des joints crantés - B = 400 cm^2/m)

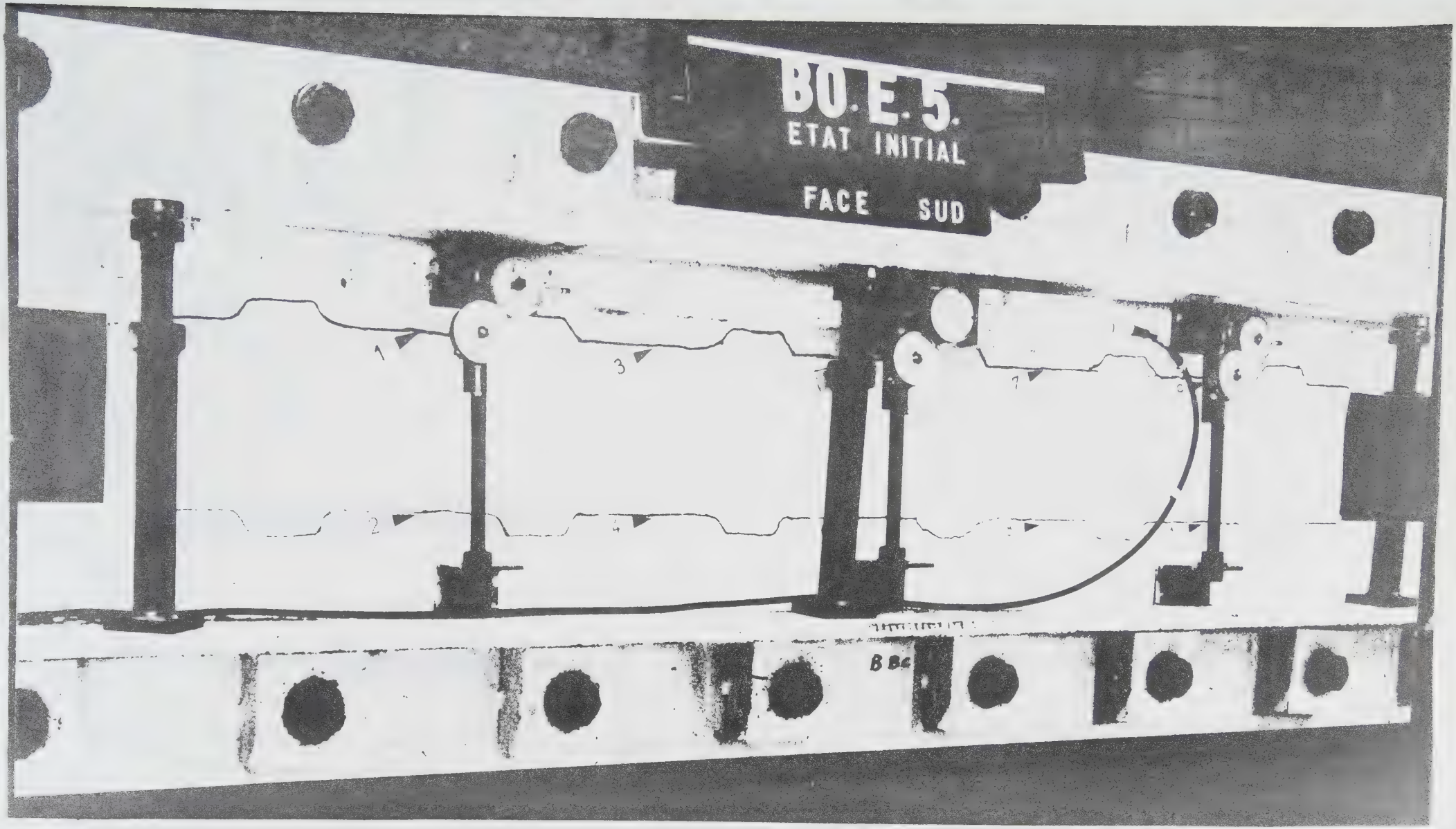


Fig. 7 - JOINT n° 5 - VERINS POUR OUVRIR LES JOINTS.

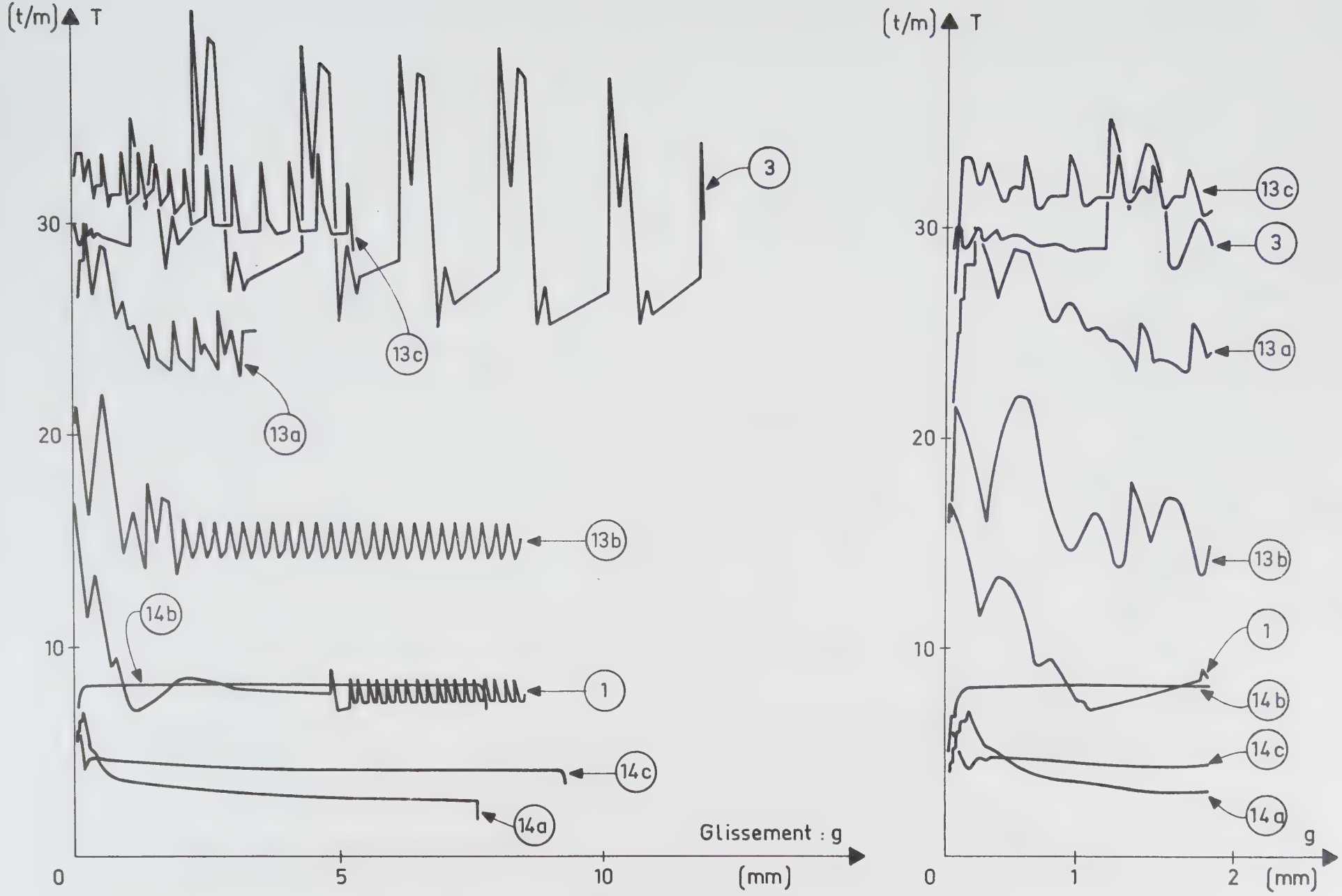
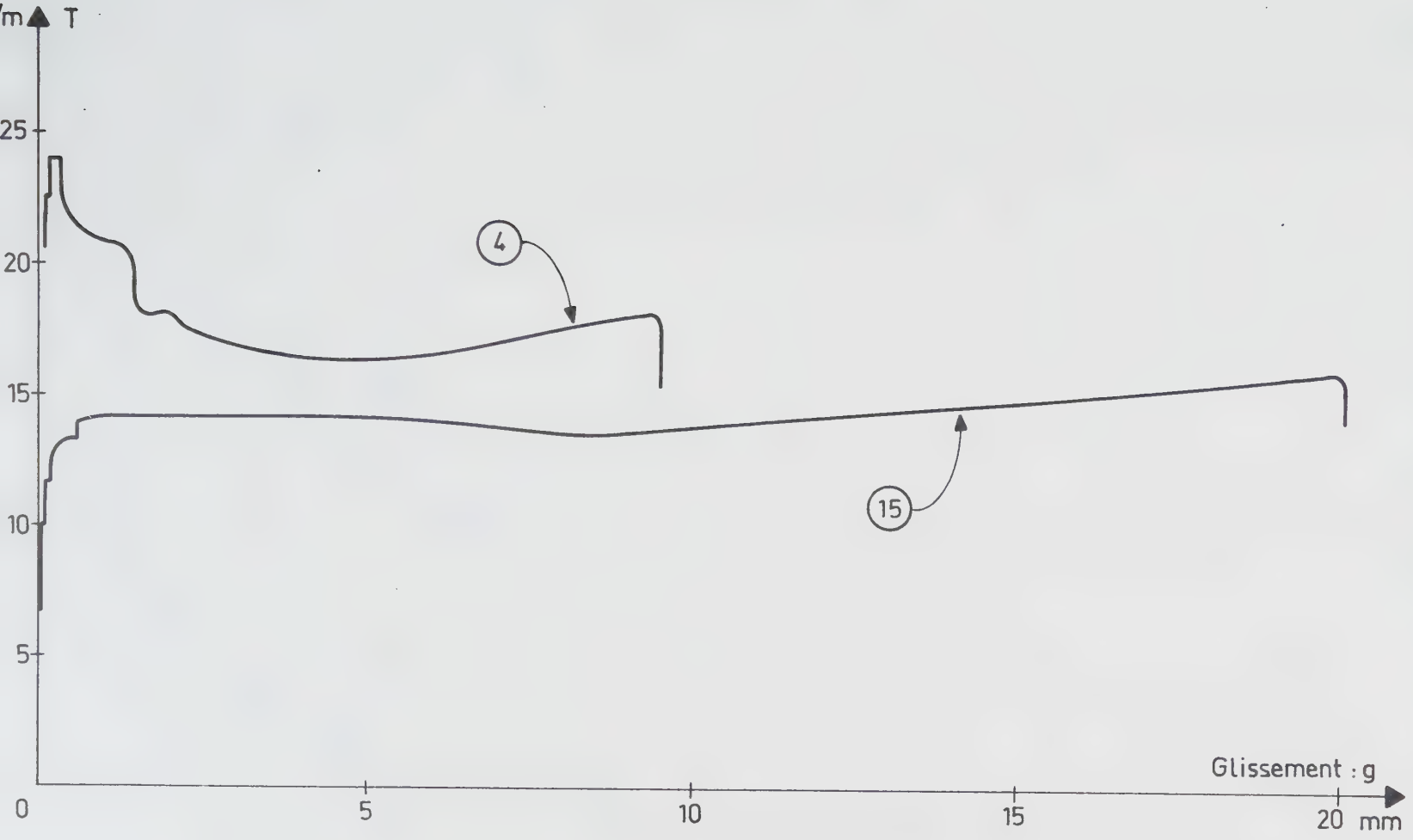


Fig. 8 - JOINTS LISSES NON ARMES.



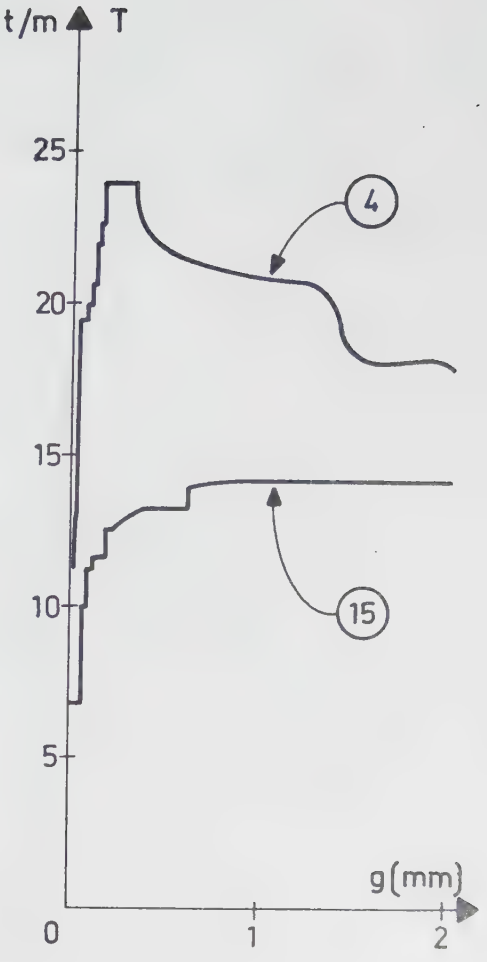


Fig. 9 - JOINTS LISSES ARMES.

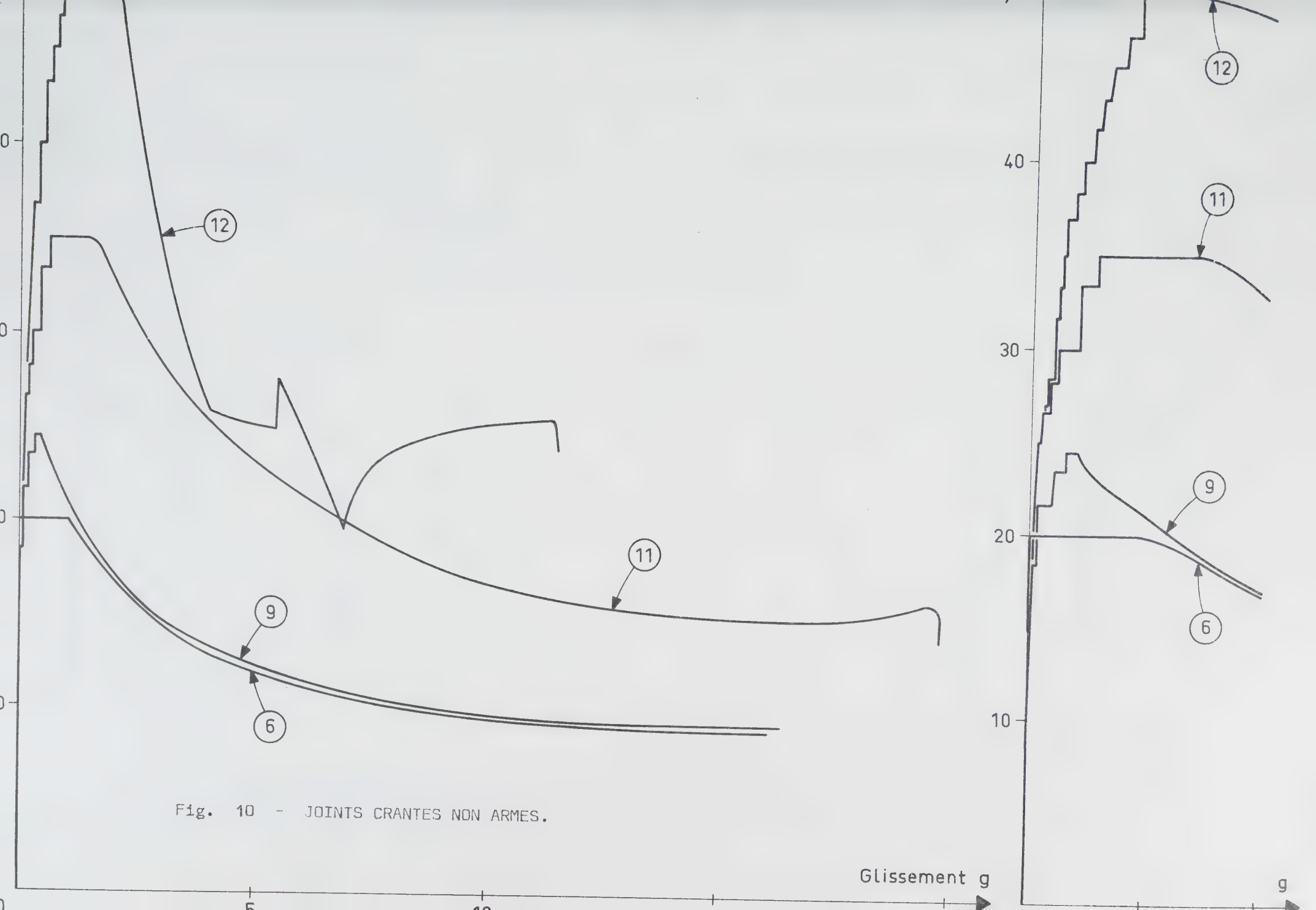


Fig. 10 - JOINTS CRANTES NON ARMES.

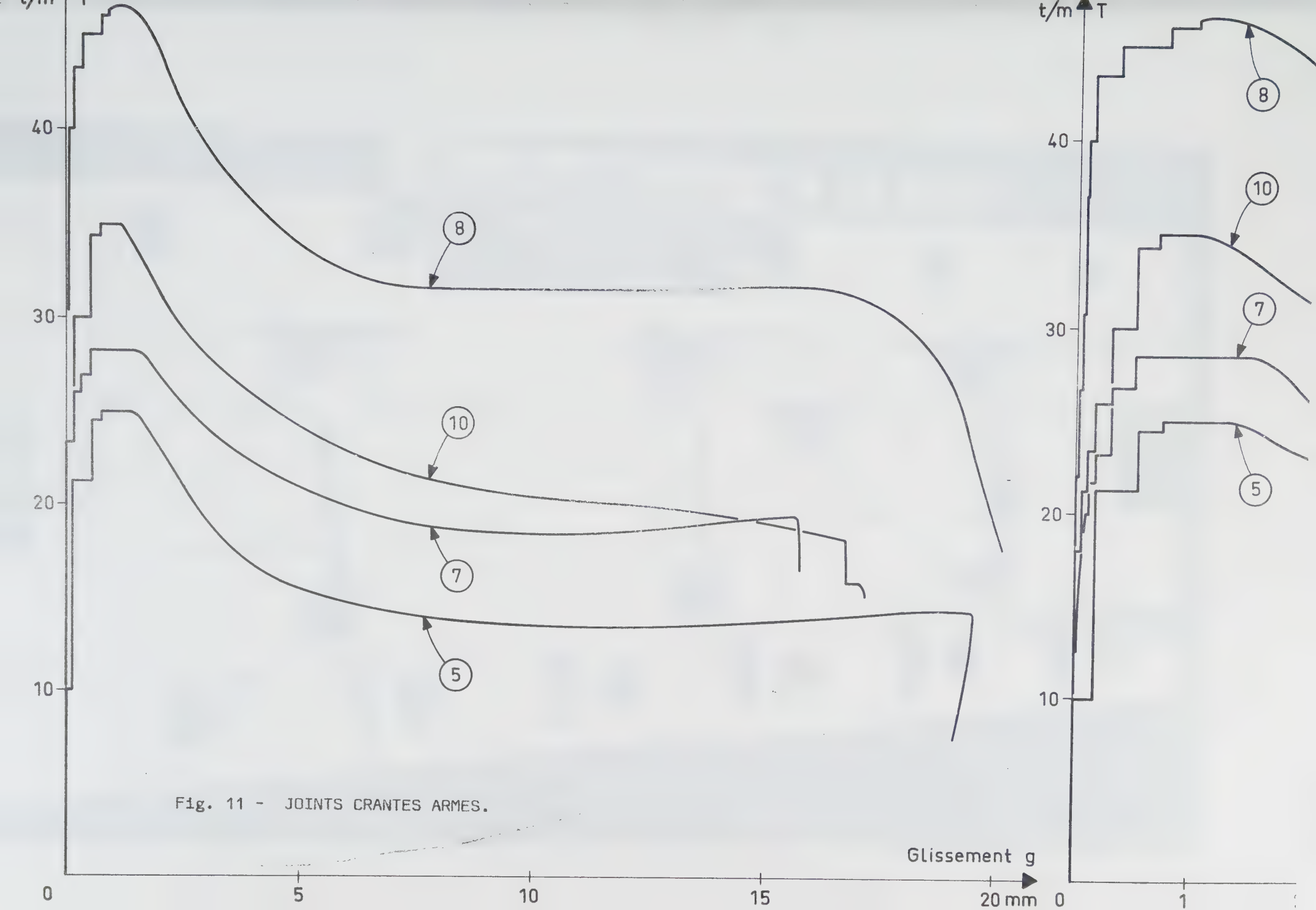


Fig. 11 - JOINTS CRANTES ARMES.

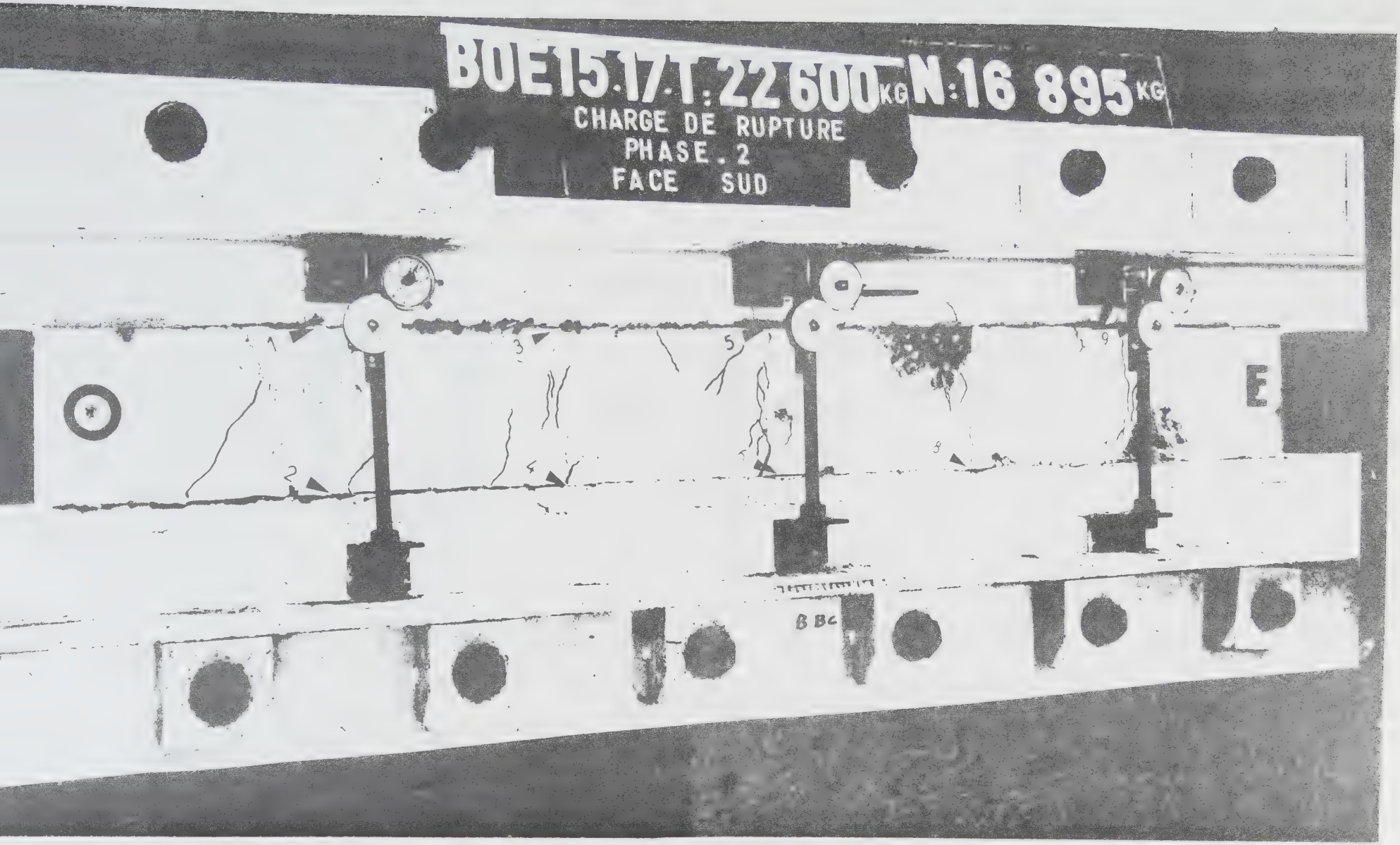


Fig. 12 FISSURATION DU JOINT LISSE ARME n° 15.

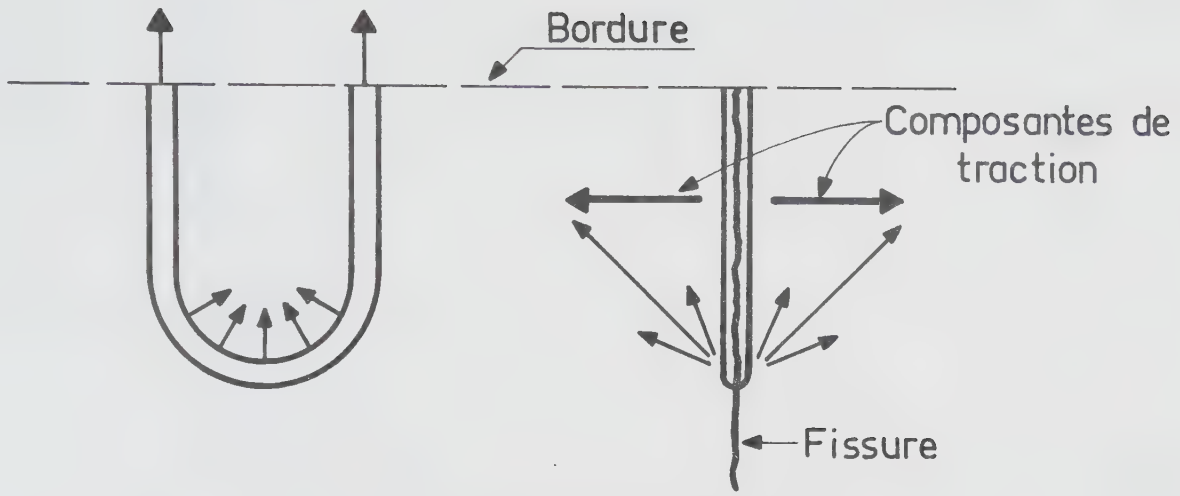


Fig. 13

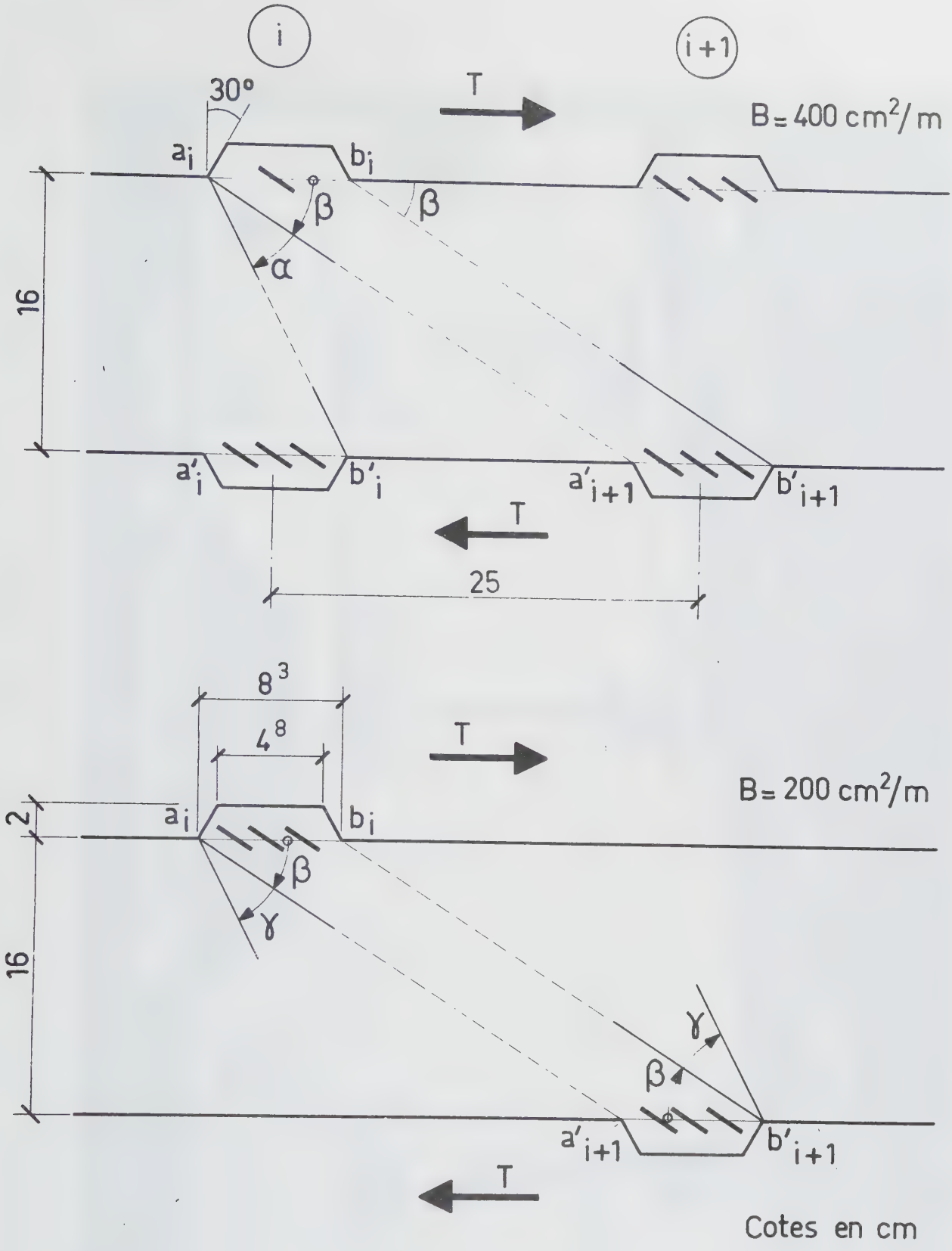

i
i+1
30°
T
B = 400 cm²/m
a_i
b_i
β
β
α
16
a'_i
b'_i
a'_{i+1}
b'_{i+1}
T
25
8³
4⁸
T
B = 200 cm²/m
2
a_i
b_i
β
γ
16
γ
β
a'_{i+1}
b'_{i+1}
T
Cotes en cm

Fig. 14

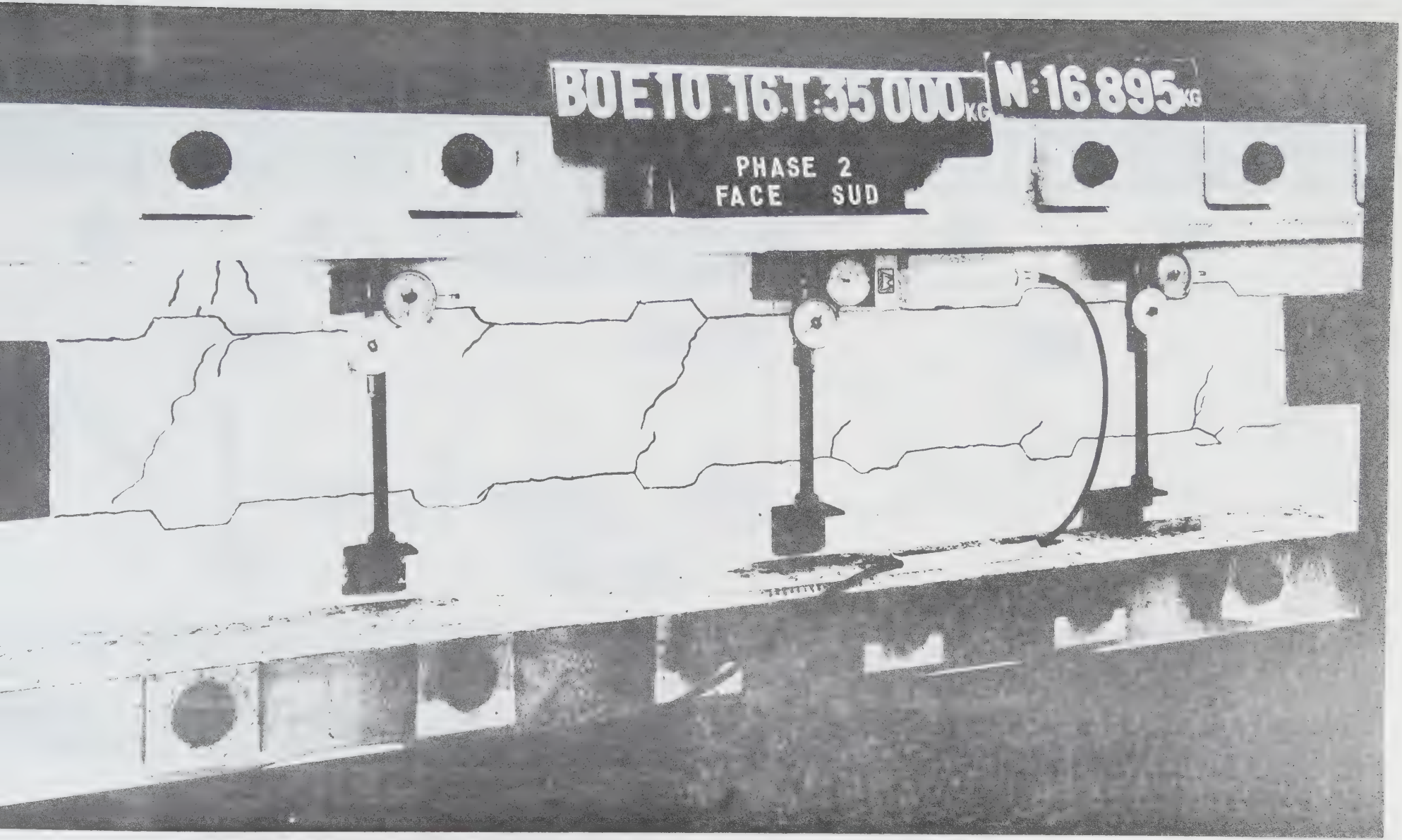


Fig. 15 - FISSURATION DU JOINT CRANTE ARME n° 10.

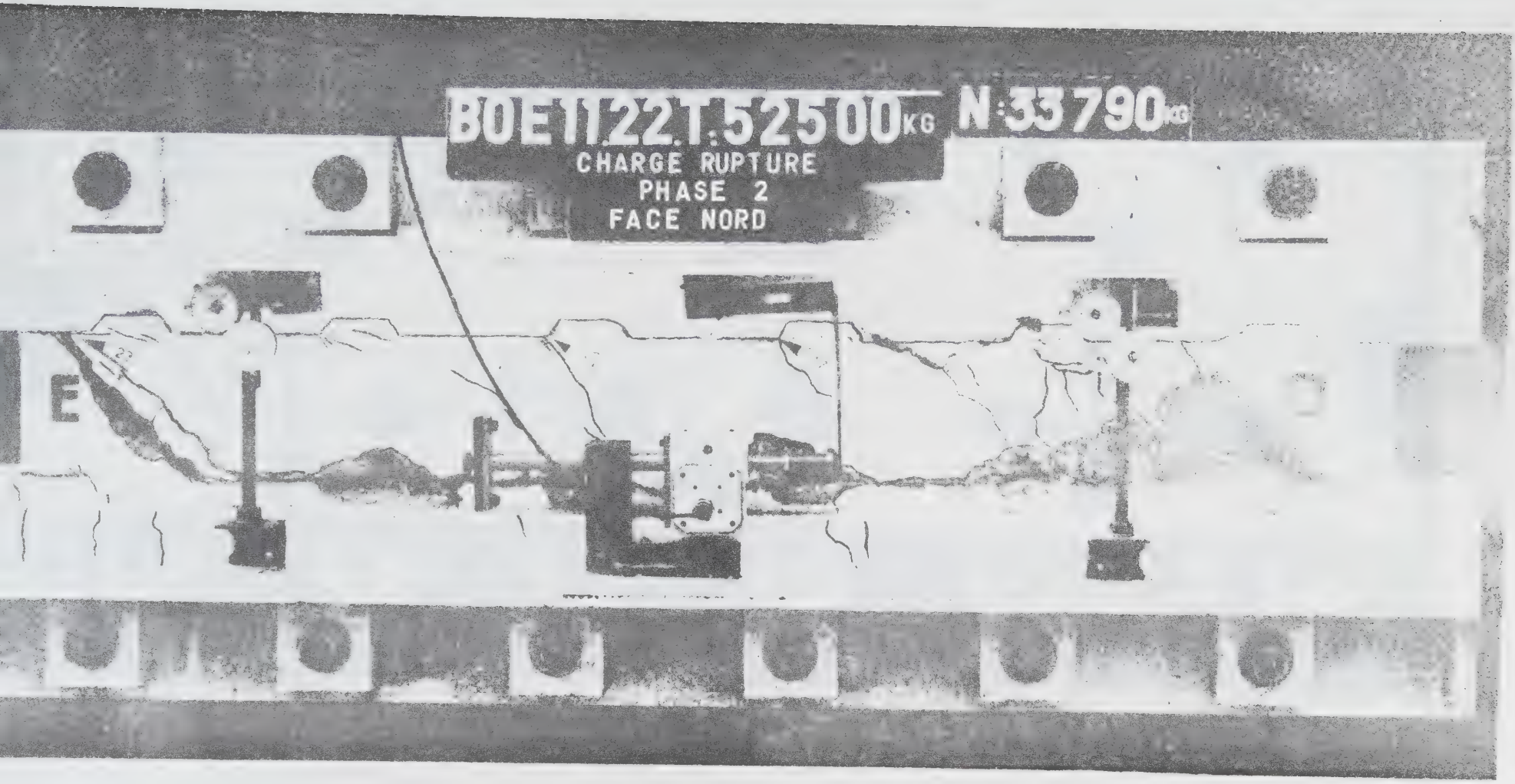


Fig. 16 - FISSURATION DU JOINT CRANTE NON ARME n° 11.

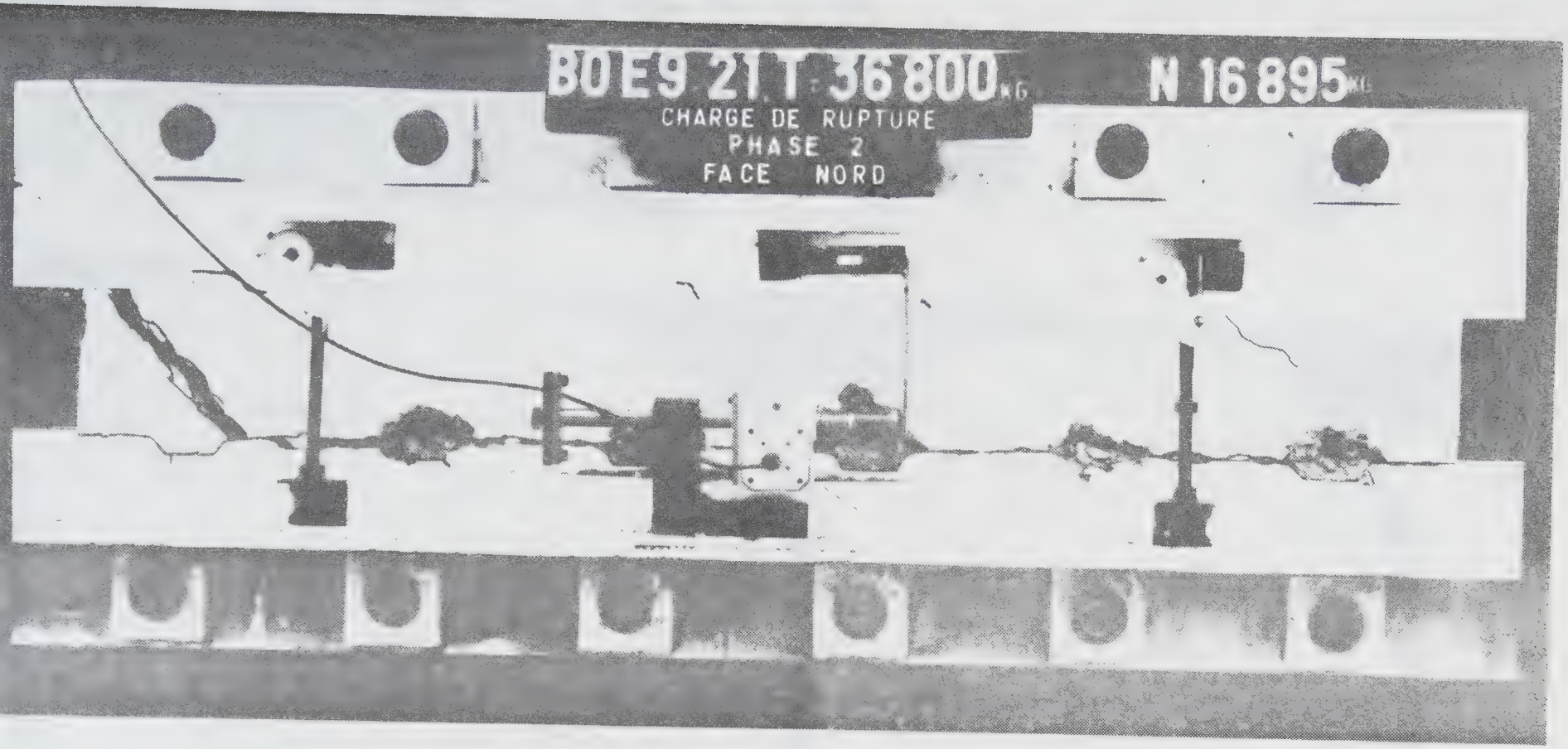


Fig. 17 - FISSURATION DU JOINT CRANTE NON ARME n° 9.

Fig. 18 — FISSURATION DU JOINT GRANTE ARME n° 7.

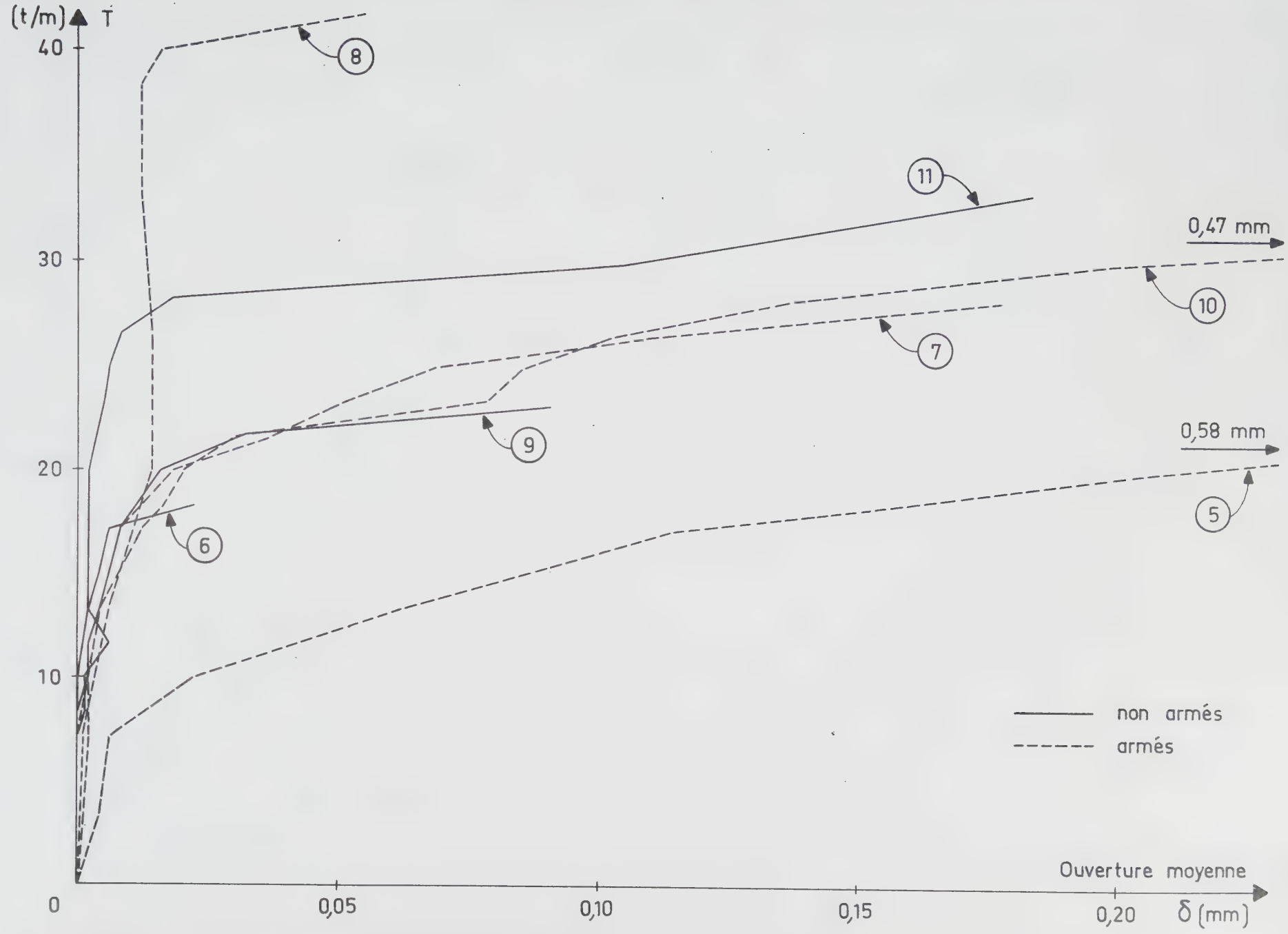


Fig. 19 - OUVERTURE MOYENNE DES JOINTS CRANTES.

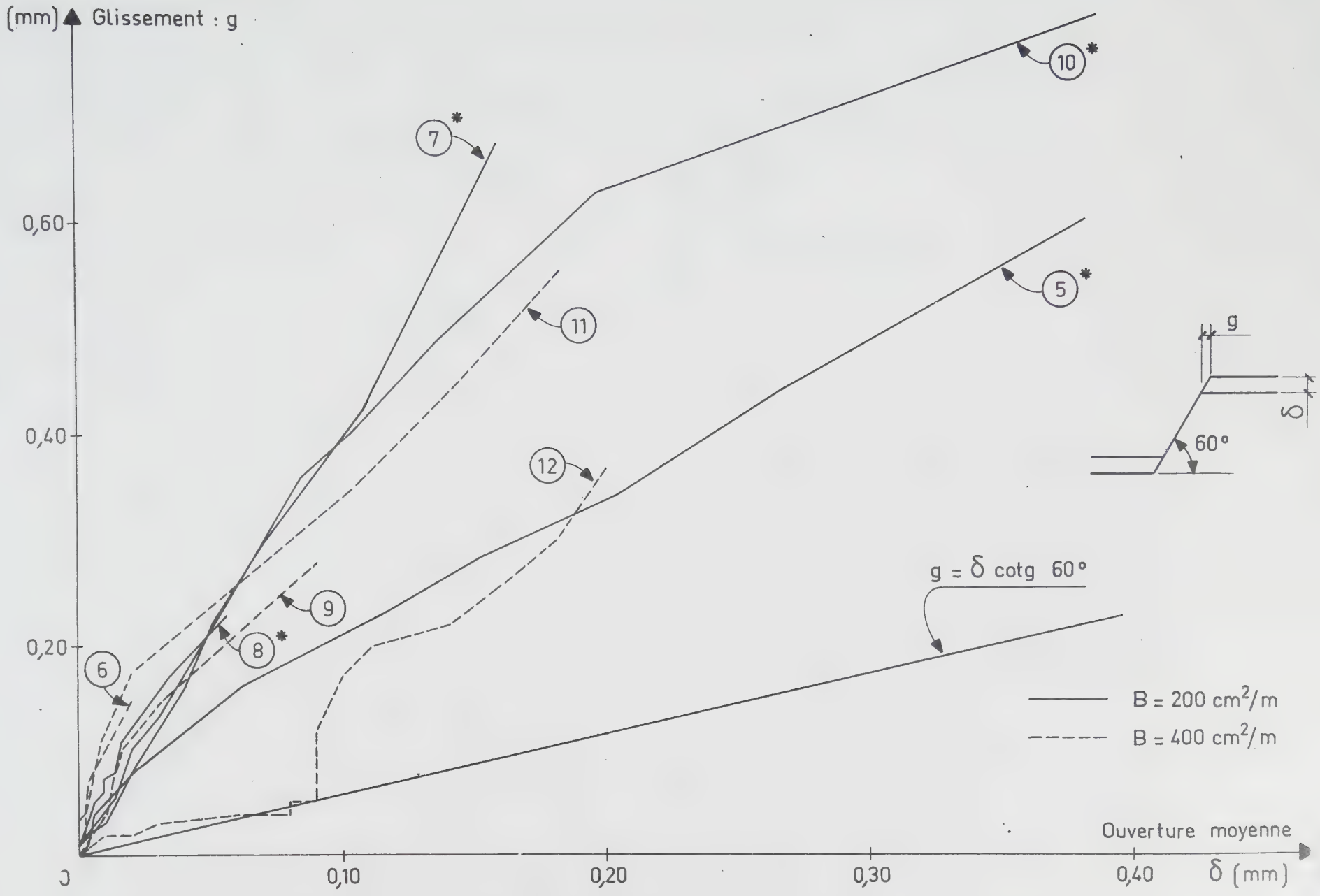


Fig. 20 - DEFORMATIONS MOYENNES DES JOINTS CRANTES (* = joint armé)

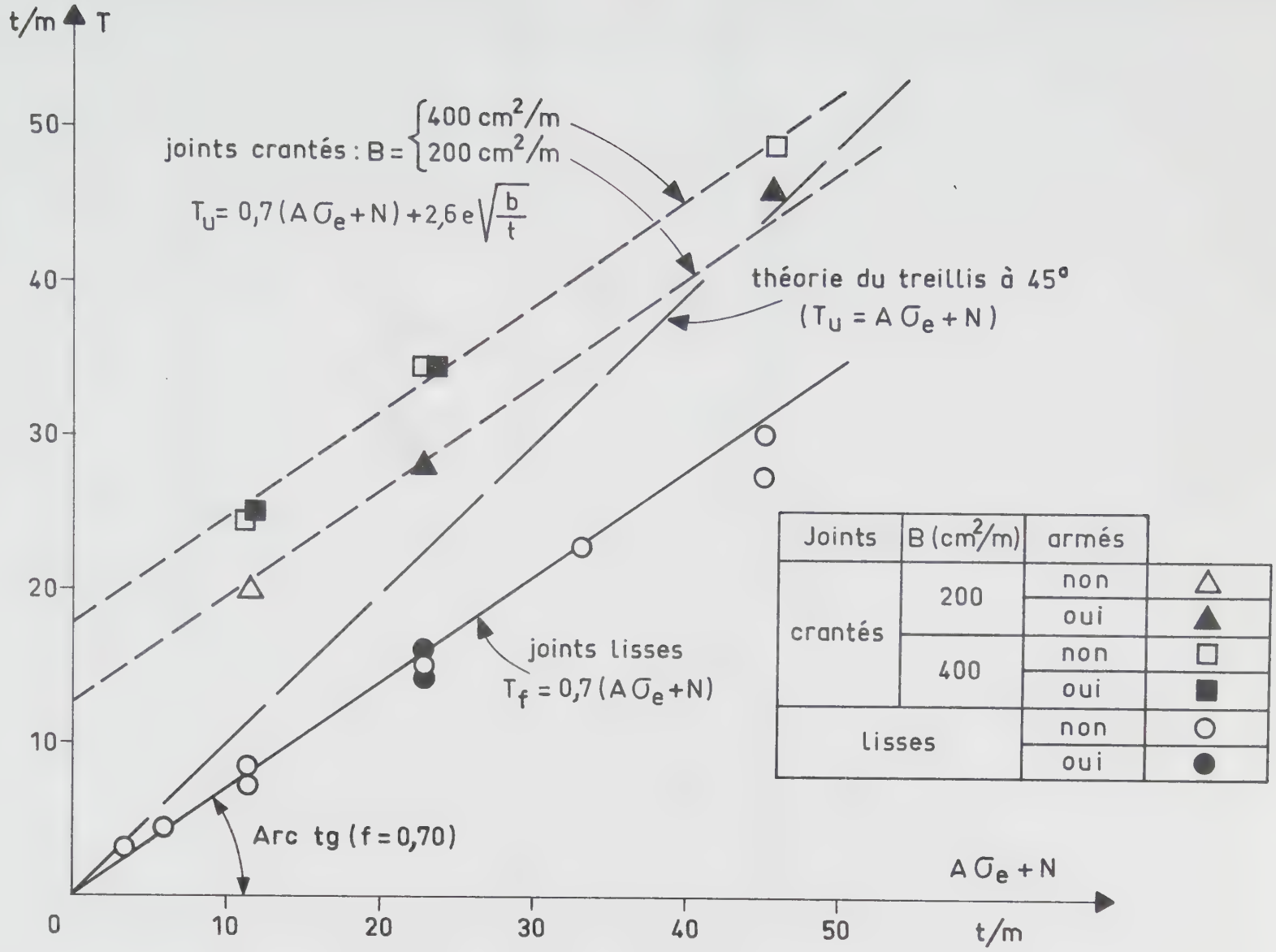

t/m T
50
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
t/m
joints crantés : B = 400 cm²/m
200 cm²/m
$T_u = 0,7 (A \sigma_e + N) + 2,6 e \sqrt{\frac{b}{t}}$
théorie du treillis à 45°
$(T_u = A \sigma_e + N)$
joints lisses
$T_f = 0,7 (A \sigma_e + N)$
Arc tg (f = 0,70)
$A \sigma_e + N$
Joints
B (cm²/m)
armés
crantés
200
non
oui
400
non
oui
lisses
non
oui

Fig. 21

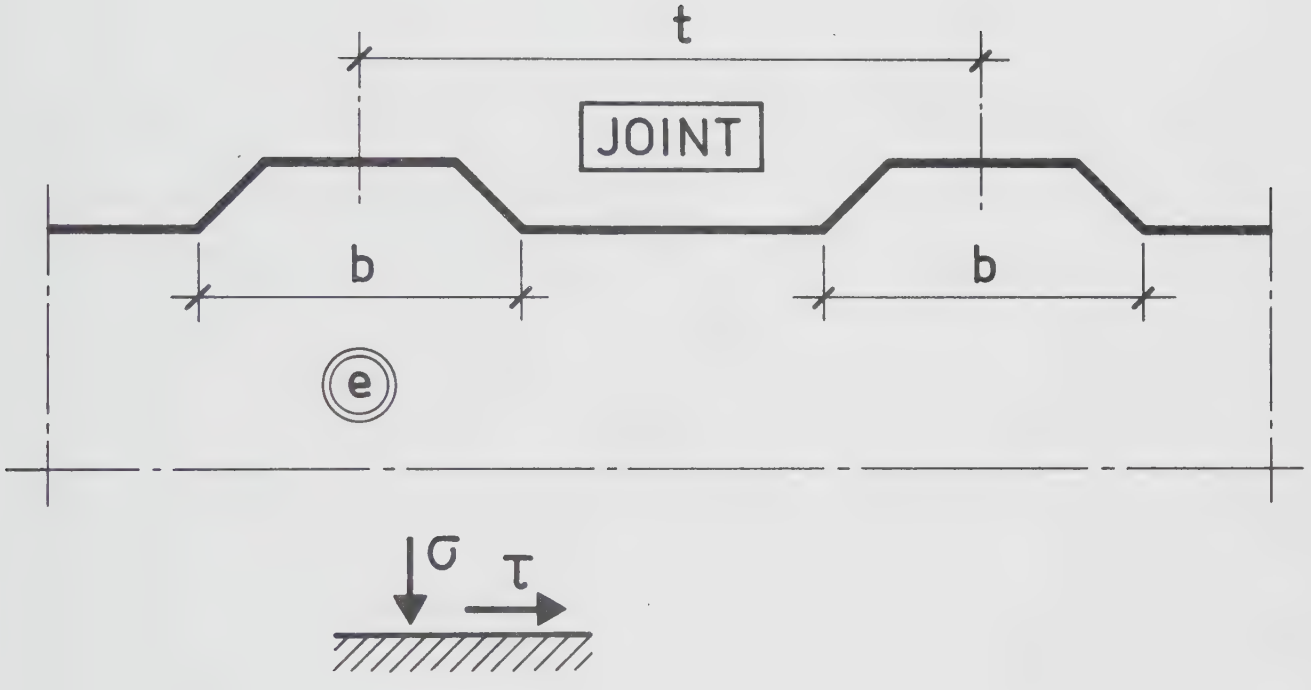


Fig. 22 - DIMENSIONS ET ESPACEMENT DES CRANS.

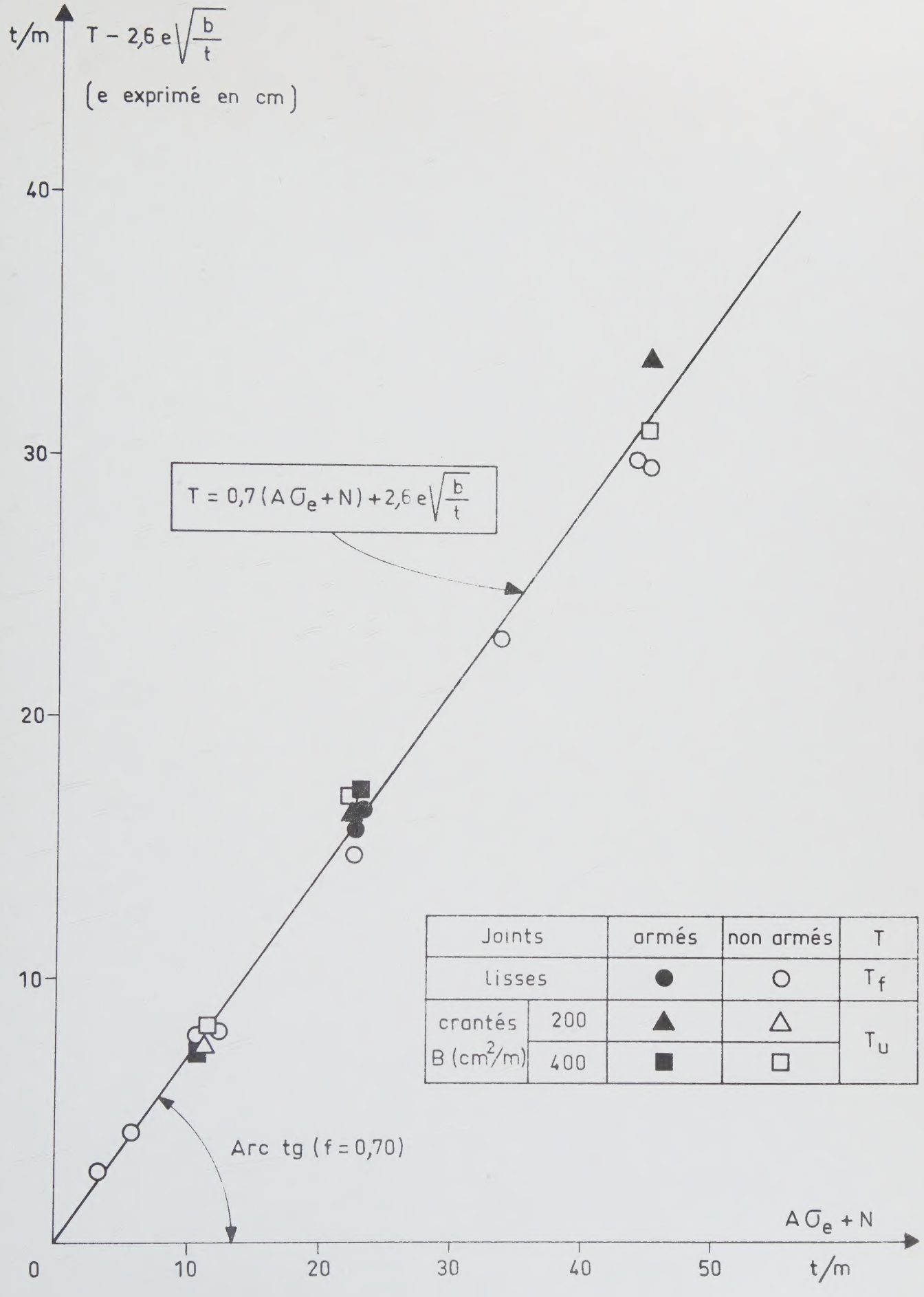

t/m
T − 2,6 e √(b/t)
(e exprimé en cm)
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
t/m
A σe + N
T = 0,7 (A σe + N) + 2,6 e √(b/t)
Arc tg (f = 0,70)
Joints
armés
non armés
T
lisses
Tf
crantés
200
B (cm²/m)
400
Tu

Fig. 23